



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

电能效率：技术与应用

Electrical Energy Efficiency: Technologies and Applications

(西班牙) Andreas Sumper 著
(意大利) Angelo Baggini

阚江明 李胜 许彦峰 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书特色

- 全面阐述电能效率中的不同技术，并且列出了工业应用中检测与控制的概念和实际设计技术；

- 介绍了目前电动机的行业标准，并以案例形式给出了性能更佳的电动机设计方案；

- 更新了电能效率相关的最新的标准化、技术、经济现实和能源效率指标；

- 涵盖了分布式系统的质量和效率（对分布式系统的影响和负载以及配电线路和变压器中能源损失的计算）。



国际电气工程先进技术译丛

电能效率：技术与应用

(西班牙) Andreas Sumper 著

(意大利) Angelo Baggini

阚江明 李 胜 许彦峰 等译



机械工业出版社

本书介绍了国外许多专家学者近些年在提高电能效率方面所做的工作和一些最新的成果。其内容涉及发电、输电、用电的各个环节,如分布式发电、变压器、电缆、电动机、照明、空调系统等主要电力设备的电能效率问题。同时还以建筑、工厂、数据中心等具体系统为目标,综合考虑提高电能效率的研究方案。

本书既可以作为高等学校电气工程相关专业高年级本科生和研究生的教材和参考书,也可作为企事业单位从事电气工程相关工作的电能设计工程师、安装工程师、M&E 设计师和经济工程师的参考手册,还可以作为能源研究者、政策制定者等从事电能效率相关工作的科技工作人员的辅导材料。

Copyright©2012 John Wiley & Sons, Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled < Electrical energy efficiency. technologies and Applications >, ISBN: 978-0-470-97551-0, by Andreas Sumper, Angelo Baggini, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2012-8707 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

电能效率: 技术与应用/(西)萨姆普,(意)巴吉尼著; 阚江明等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 7

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Electrical energy efficiency: technologies and applications

ISBN 978-7-111-47145-5

I. ①电… II. ①萨…②巴…③阚… III. ①电能效率-研究
IV. ①TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 137116 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

版式设计: 霍永明 责任校对: 纪 敬

封面设计: 马精明 责任印制: 刘 岚

北京云浩印刷有限责任公司印刷

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·22.5 印张·443 千字

0 001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47145-5

定价: 98.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服 务 中 心: (010) 88361066 教 材 网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

电能是我们最方便使用的能源形式，离开了电能，现代的生活简直不可想象。然而电能却主要来源于煤炭、石油、天然气等化石能源。这些化石能源的有限性和不可逆转性使我们随时面临着电能中断的威胁。化石能源的过度使用同时使我们的生存环境受到极大影响，环保问题已成为世界各国的战略性问题。我们正在努力寻找清洁的、可持续使用的新能源来替代化石能源进行发电，尽管已经有了很多成果，但目前距离完全替代化石能源的使用还相距太远。也许在当前，减少电能的消耗才是我们减少化石能源消耗、保护环境资源最直接、最有效的手段。减少电能消耗并不仅仅代表我们不使用或少使用电能，而是要减少电能的浪费，提高电能的使用效率。本书介绍了国外许多专家、学者近些年在提高电能效率方面所做的工作和一些最新的成果。其内容包括发电、输电、用电的各个环节，如分布式发电、变压器、电缆、电动机、照明、空调系统等主要电力设备的电能效率问题。同时还以建筑、工厂、数据中心等具体系统为目标，综合考虑电能效率的提高。这些方面我国的专家们研究得并不是很多，可以作为我们很好的借鉴。

本书第1、2、8章由阚江明、庞帅、崔鑫彤负责翻译，第3、6、9章由许彦峰、柏晓鹤、陈芄、张智鹏、刘欢负责翻译，第5、7、10章由李胜、朱阅、詹传栋、刘念、王亚雄负责翻译，第4、13章由郑一力、葛桃桃、单芳婷、李晨乐、魏豪杰负责翻译，第11、12章由闫磊、王明枝负责翻译。统稿由阚江明负责。由于译者水平有限，错误之处难免，欢迎广大同仁批评指正。

译者

原 书 序

毋庸置疑，能源安全和气候变化是被政策制定者讨论最频繁的两个话题。石油价格现在大概在 100 美元/桶，而且由于需求的增长和储量的持续减少，石油价格将会保持这个水平甚至可能会增长。在科学界，人类在气候变化上的影响已无争议，同时还有一些令人担忧的消息，例如不可逆转的影响也已经开始，只有显著降低 CO₂ 排放量才能减轻其对社会产生的巨大和成本高昂的影响。

作为许多国家和国际战略的关键组成部分，能源效率和能源保护得到了重视，用来减轻气候变化的影响，提高能源供应的安全性，增加竞争力，保护自然资源（其中包括能源、材料和水等），并且减少其他与能源相关的环境污染。然而，建筑、设备和工业系统领域从研发到实施在能源效率技术的投入远低于其在经济、能源和气候变化所应有的投入。

能源效率的政策、项目和支持方案仍然很需要克服来自市场、制度、财政和法律的障碍，并且在一个可以证明合理的经济行为水平上，为能源效率投资创造良好的市场。特别是对能源效率技术的支持方案上饱受争议，如大多数人认为未来能源节约成本的诸多考虑应该合理，能够激励终端用户应用能源效率技术。

另一个主要问题是我们要意识到如果想要减少不可避免的全面的气候变化影响，减少绝对能源需求才是最重要的。能源需求的降低可以通过改善服务提供（技术的方面）的能源效率和不通过进行技术改革（行为方面，例如减少过度加热或者过度制冷及减少驾驶）来实现能源节约。能源效率是实现能源节约的一个重要组成部分，因为它允许在更少的能源消耗下具有相同的服务（例如照明、制冷和加热）。然而，改进的能源效率，也就是说用一个更有效率的技术去替代原有的技术，本身并不能保证节约能源。这里有大量相关案例，引入更高效的技术结果导致它的实际消耗量却增加，这是由于反弹效应或是更大、更多的装置与设备（体积更大、使用更频繁的设备）的安装造成的。

众多的政策制定者、经济学家和学者（来自科技、经济、政策和人类行为等各个方面）对能源效率和节能方面越来越感兴趣，这就需要更深入探索节能技术（例如控制系统、半导体照明、变速传动和真空绝缘装置），并且收集在政策和与

能源使用、消耗和行为相关的社会经济问题上的新证据。与此同时，随着在能源效率和能源节约领域的政策活动的增加，对于在不同的国家评价过去和现在的政策有一个新的需求，以此来表明能源效率在能源安全和减轻气候变化影响方面的明确贡献。

Paolo Bertoldi

欧盟委员会

联合研究中心

伊斯普拉，意大利

原 书 前 言

能源效率技术是不同工程领域的一项常用（共性）技术，用来减少提供产品和服务所需要的能量。正如电能是人们所知的最为灵活的能量形式，且也是在工业和商业应用中最重要能源形式之一，因此电能效率值得特别关注。电能效率技术是一套用来提高电能应用效率的工程技术，这些工程技术应用得非常广泛，并且与电能质量工程及电能应用中的热能工程有所不同，还包括经济方面的内容。

在未来几年，连同电能安全一起，电能效率将会成为包括安装和建设等每一道工序的强制性设计准则。

电能效率工程的困难在于如何获得具体应用的整体认识。在大多数情况下，需要具备具体应用的专业知识，同时为了实现全面的效率目标，对于工业工序和要解决的问题的深入理解也是必需的。通常部分问题最优解决方案对工序的全面能源效率提供了一个适度的贡献。工程师应该掌握多学科的专业知识，例如电力应用、电能质量、控制技术和热能传递等相关专业知识。此外，工程师还应具有分析工业过程和决定需要采取什么样的效率行动的能力。

电能效率的提高与采取的效率措施的评价密切相关，主要由投资分析进行评价。高效的解决方法通常需要更高的投资，并且这些经常需要管理部门的许可。管理者也必须理解能源高效的解决方法是如何提高过程效率及如何实现更高的生产率。

在 2000 年，一个由学者和工业家组成的团体推动了一个由欧盟委员会联合资助的终身学习项目，该项目致力于被称作“莱昂纳多电能质量倡议”（Leonardo Power Quality Initiative, LPQI）的电能质量问题的解决，并组建了一个能源专家网络。该能源专家网络推动了数个后续项目，如 LPQIves 和莱昂纳多能源。关于这些项目的更多信息可以在莱昂纳多能源主页上查找到（<http://www.leonardo-energy.org>）。受到这些项目的启发，部分工作组成员撰写了 Handbook of Power Quality（电能质量手册），该手册在 2008 年由 Angelo Baggini 编辑。

2008 年在布鲁塞尔的一个项目会议上，能源专家们产生了撰写电能效率综合图书的想法，并且在随后的几年中，这本书的内容被逐渐撰写完成。

本书的创新之处是通俗易懂地向读者介绍提高电能效率技术与应用的知识。读者将会发现在这本综合性图书中，对电力工程最重要的工业和商业领域的电能效率技术都给出了专家观点。本书每一章都覆盖了一种不同的技术，这些技术的目的是在一个很宽泛的应用领域中实现节能目标。

在开始学习本书之前，我们要感谢来自不同国家对本书各章做出贡献的作者，没有他们的专业观点，这项工作是不可能完成的。我们希望你会饶有兴致地阅读本书。

Andreas Sumper，巴塞罗那，西班牙

Angelo Baggini，帕维亚，意大利

作者名单

Angelo Baggini
Industrial Engineering Department
University of Bergamo
Via Marconi 5 24044 Dalmine BG, Italy

Joan Bergas-Jané
Centre d'Innovació Tecnològica en
Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial de Barcelona
Av. Diagonal, 647. Planta 2 08028
Barcelona, Spain

Franco Bua
ECD Engineering Consulting and Design
Vai Maffi 21
27100 Pavia, Italy

Mircea Chindris
Electrical Power Systems Dept.
Technical University of Cluj-Napoca
15, C.Daicoviciu st.
400020 Cluj-Napoca, Romania

Andrei Czicker
Electrical Power Systems Dept.
Technical University of Cluj-Napoca
15, C.Daicoviciu st.
400020 Cluj-Napoca, Romania

Wim Deprez
Dept. Electrical Engineering ESAT

K.U. Leuven, Research group ELECTA
Kasteelpark Arenberg 10
3001 Heverlee, Belgium

Stefan Fassbinder
Beratung elektrotechnische Anwendungen
Deutsches Kupferinstitut
Am Bonneshof 5
D-40474 Dusseldorf, Germany

Zbigniew Hanzelka
University of Science and Technology –
AGH
30-059 Cracow, Al. Mickiewicza 30
Poland

Joris Lemmens
Dept. Electrical Engineering ESAT
K.U. Leuven, Research group ELECTA
Kasteelpark Arenberg 10
3001 Heverlee, Belgium

Annalisa Marra
ECD Engineering Consulting and Design
Vai Maffi 21
27100 Pavia, Italy

Daniel Montesinos-Miracle
Centre d'Innovació Tecnològica en
Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial de Barcelona

Av. Diagonal, 647. Planta 2 08028
Barcelona, Spain

Paola Pezzini
Centre d'Innovació Tecnològica en
Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial de Barcelona
Av. Diagonal, 647. Planta 2 08028
Barcelona, Spain

Krzysztof Piątek
University of Science and Technology –
AGH
30-059 Cracow, Al. Mickiewicza 30,
Poland

Edris Pouresmaeil
Centre d'Innovació Tecnològica en
Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya
(UPC)
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial de Barcelona
Av. Diagonal, 647. Planta 2 08028
Barcelona, Spain

Jaume Salom
Institut de Recerca en Energia de Catalunya
(IREC)
Jardins de les Dones de Negre 1, 2^a pl.
08930 Sant Adrià de Besòs, Spain

Antoni Sudrià-Andreu
Centre d'Innovació Tecnològica en
Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial de Barcelona
Av. Diagonal, 647. Planta 2 08028
Barcelona, Spain

Andreas Sumper
Centre d'Innovació Tecnològica en
Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica
Industrial de Barcelona
Carrer Comte d'Urgell, 187 - 08036
Barcelona, Spain

and

Institut de Recerca en Energia de Catalunya
(IREC)
Jardins de les Dones de Negre 1, 2^a pl.
08930 Sant Adrià de Besòs, Spain

Waldemar Szpyra
University of Science and Technology –
AGH
30-059 Cracow, Al. Mickiewicza 30,
Poland

Roman Targosz
Polish Copper Promotional Centre
Plac Jana Pawła II 1-2
50-136 Wrocław, Poland

Roberto Villafáfila-Robles
Centre d'Innovació Tecnològica en
Convertidors Estàtics i Accionaments
(CITCEA)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica
Industrial de Barcelona
Carrer Comte d'Urgell, 187 - 08036
Barcelona, Spain

Irena Wasiak
Politechnika Łódzka
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki,
Automatyki i Informatyki
Instytut Elektroenergetyki
ul. Stefanowskiego 18/22
90-924 Łódź, Poland

目 录

译者序

原书序

原书前言

作者名单

第 1 章 能源效率标准化概述	1
-----------------	---

1.1 标准	3
1.1.1 ISO	3
1.1.2 IEC	4
1.1.3 CEN 与 CENELEC	5
深入阅读材料	7

第 2 章 电缆和线路	8
-------------	---

2.1 热传递原理	8
2.1.1 传导	9
2.1.2 对流	9
2.1.3 辐射	9
2.2 架空电缆的额定电流值	10
2.3 经济因素	13
2.4 电流额定值计算：总体费用	14
2.4.1 CJ 估计	14
2.5 经济导体尺寸的决定	16
2.5.1 经济电流范围计算	16
2.5.2 给定负荷的经济导体尺寸计算	16
2.6 小结	17
参考文献	17

第 3 章 电力变压器	18
-------------	----

3.1 变压器中的损耗	20
3.1.1 无负荷损耗	20
3.1.2 有负荷损耗	20

3.1.3 辅助设施损耗	21
3.1.4 由于谐波、不平衡和无功功率所产生的额外损耗	21
3.2 效率和负荷因数	25
3.3 损耗和冷却系统	27
3.4 能效标准和规则	27
3.4.1 MEPS	32
3.4.2 强制性标识	32
3.4.3 非强制性项目	32
3.5 生命周期成本	35
3.5.1 变压器的生命周期成本	35
3.5.2 细节问题	38
3.6 设计、材料和制造	41
3.6.1 铁心	42
3.6.2 绕组	46
3.6.3 其他发展	47
3.7 案例研究——工业变压器的约束理论评价	48
3.7.1 方法	49
3.7.2 结果	50
3.A 附录	53
3.A.1 MEPS 选录	53
参考文献	60
深入阅读材料	61
第4章 楼宇自动化、控制和管理系统	62
4.1 节约能源的自动化功能	63
4.1.1 温度控制	64
4.1.2 采光	64
4.1.3 驱动器和电动机	65
4.1.4 技术报警和管理	65
4.1.5 远程控制	66
4.2 自动化系统	66
4.2.1 KNX 系统	67
4.2.2 SCADA 系统	71
4.3 自动化设备自身的消费	74
4.4 基本计划	75
4.4.1 加热和冷却	75

XII 电能效率：技术与应用

4.4.2 通风及空气调节	83
4.4.3 照明	93
4.4.4 遮光系统	96
4.4.5 建筑技术管理	96
4.4.6 建筑内的技术安装	97
4.5 建筑节能性能评估	99
4.5.1 欧洲标准 EN 15232	99
4.5.2 方法的比较	103
深入阅读材料	108
第5章 电能质量现象与指标	109
5.1 电压有效值	110
5.1.1 电源	111
5.1.2 对能量效率的影响	111
5.1.3 调节方法	113
5.2 电压波动	114
5.2.1 扰动描述	115
5.2.2 电压波动的来源	115
5.2.3 效能与成本	117
5.2.4 缓解方法	119
5.3 电压和电流的不平衡	120
5.3.1 扰动描述	120
5.3.2 电源	121
5.3.3 效能与成本	121
5.3.4 缓解方法	124
5.4 电压和电流的畸变失真	125
5.4.1 干扰描述	125
5.4.2 失真源	127
5.4.3 能效与成本	128
5.4.4 缓解方法	132
参考文献	138
深入阅读材料	139
第6章 现场发电和微电网	140
6.1 分散能源技术	141
6.1.1 能量来源	141

6.1.2 能量储存	143
6.2 DG 在分布式电网中能源损耗的影响	148
6.3 微电网	151
6.3.1 概念	151
6.3.2 储能的应用	153
6.3.3 管理和控制	155
6.3.4 微电网中的电能质量和可靠性	157
参考文献.....	158
深入阅读材料.....	160
第7章 电动机	161
7.1 电动机损耗	162
7.1.1 功率平衡和能源效率	162
7.1.2 损耗分类	164
7.1.3 影响因素	166
7.2 电动机能效标准	170
7.2.1 功能分类标准	170
7.2.2 测量标准	171
7.2.3 变速驱动器的未来标准	177
7.3 高效电动机技术	178
7.3.1 电动机材料	180
7.3.2 电动机设计	188
7.3.3 电动机制造	192
参考文献.....	194
第8章 照明	196
8.1 能源和照明系统	196
8.1.1 照明系统中的能源消耗	196
8.1.2 照明系统的能源效率	197
8.2 规定	199
8.3 照明系统技术进展	200
8.3.1 高效光源	200
8.3.2 高效镇流器	205
8.3.3 高效灯具	206
8.4 室内照明系统的能源效率	207
8.4.1 支持能源效率的政策	207

8.4.2 改造还是重新设计	209
8.4.3 照明控制	211
8.4.4 采光	215
8.5 户外照明系统的能源效率	216
8.5.1 高效光源和灯具	216
8.5.2 户外照明控制	218
8.6 照明系统维护	221
参考文献	222
深入阅读材料	224
第9章 电气驱动和电力电子	225
9.1 感应电动机和 PMSM 的控制方法	227
9.1.1 V/f 控制	228
9.1.2 矢量控制	231
9.1.3 DTC	233
9.2 能量最优控制法	235
9.2.1 变换器的损耗	236
9.2.2 电动机损耗	236
9.2.3 能量最优控制策略	237
9.3 VSD 拓扑结构	237
9.3.1 输入阶段	238
9.3.2 直流母线	239
9.3.3 逆变器	240
9.4 功率半导体的新趋势	241
9.4.1 调制技术	241
9.4.2 不同调制方式的回顾	243
参考文献	250
深入阅读材料	252
第10章 工业热处理	253
10.1 工业电力加热的通用特性	256
10.2 主要电加热技术	259
10.2.1 电阻加热	259
10.2.2 红外加热	265
10.2.3 感应加热	268
10.2.4 介电加热	271

10.2.5 电弧炉	278
10.3 增加工业加热进程中能源效率的具体方法	279
10.3.1 更换传统加热技术	279
10.3.2 选择最合适的电子技术	281
10.3.3 现代电子技术设备效率的提高	281
参考文献	284
深入阅读材料	285
第 11 章 HVAC	286
11.1 基本概念	287
11.2 环境热舒适度	288
11.3 HVAC 系统	292
11.3.1 能源转换	294
11.3.2 能量平衡	296
11.3.3 能源效率	297
11.4 HVAC 系统的能源效率措施	298
11.4.1 终端服务	298
11.4.2 被动方法	298
11.4.3 变换装置	301
11.4.4 能源	302
参考文献	303
深入阅读材料	303
第 12 章 数据中心	304
12.1 标准	304
12.2 消耗概况	305
12.2.1 能源性能指标	306
12.3 IT 基础设施与设备	307
12.3.1 刀片式服务器	307
12.3.2 存储器	307
12.3.3 网络设备	308
12.3.4 整合	308
12.3.5 虚拟化	309
12.3.6 软件	309
12.4 设备基础设施	309
12.4.1 电力设备基础设施	309

12.4.2 HVAC 基础设施	311
12.5 DG 和 CHP 的数据中心	314
12.6 组织能源效率	315
深入阅读材料	316
第 13 章 无功补偿	317
13.1 公用电力网络中的无功补偿	319
13.1.1 无功补偿的经济效益	322
13.2 工业网络的无功补偿	325
13.2.1 线性负荷	326
13.2.2 组补偿	327
13.2.3 非线性负荷	331
13.3 无功补偿	335
13.3.1 同步冷凝器	335
13.3.2 电容器组	337
13.3.3 电力电子补偿器/稳定器	337
参考文献	342
深入阅读材料	342

第 1 章 能源效率标准化概述

Franco Bua 和 Angelo Baggini

自从 20 世纪 70 年代的石油危机开始，世界上的许多国家都在推进其所有经济领域能源效率的提高。由于它们在经济政策和经济结构上的改变，这些国家有能力减少经济增长中的一次能源消耗量。

能源强度^①的下降速率并没有持续很长时间。许多国家，在 1970 ~ 1990 年^②，能源强度由下降趋势转为上升趋势。

国际能源机构（International Energy Agency, IEA）报告提到，与 20 世纪 90 年代实施的能源效率和气候政策相比，19 世纪 70 年代的石油价格冲击和因此而来的能源政策，在控制能源需求和 CO₂ 排出量上更有效^③。

然而自从 21 世纪早期开始，由于能源价格的上涨和人们对气候变化的更为关注，改善能源强度的速度呈现上升趋势。

不容赘述，提高能源效率已经成为各国政治日程中的重点。提高能源效率对于解决能源安全和解决经济环境挑战十分重要。

为了协助政府实施能源效率政策，许多组织对于已认定的优先区域制定了一系列的推荐方案和建议措施^④。每个国家将会选出最适合本国独特经济、社会、政治形势的政策。

对于这些政策和措施^⑤，世界能源理事会（World Energy Council）^⑥给出了如下分类：

1. 机构和项目

- 1) 机构：专门机构（国家，区域，本地），行政部门。
- 2) 国家能源效率项目：有定量指标和法令。

2. 监管措施

- 1) 最低效率标准和标签：电器（如电冰箱、洗碗机、空调器、灯具、热水器和电动机等）、汽车和建筑（包括已有建筑和新建筑）。

① 指增加单位 GDP 的能源需求，即单位产值能耗。——译者注

② IEA（2007），新千年能源使用在 IEA 成员国中的趋势，OECD/IEA，巴黎。

③ 例如，IEA 向最近召开的 G8 国家首脑会议提交了一套具体的能源效率政策措施建议。关于这些建议更详细的内容参考相关文件（http://www.iea.org/textbase/papers/2008/cd_energy_efficiency_policy/index_EnergyEfficiencyPolicy_2008.pdf）。

④ IEA 提供了一个能源效率政策和措施的综合数据库（http://www.iea.org/textbase/pm/index_effi.asp）。

⑤ WEC，Energy Efficiency: A Recipe for Success（能源效率：成功的秘诀），2010，第 40 页。

2) 其他为指定客户制定的规则：强制性能源管理、强制性能源消耗报告、强制性节能和维护。

3) 能源公司作为消费者对节能的职责。

3. 经济和财政措施

1) 对审查部门给予补贴（工业、商业、公共事业、家庭、低收入家庭交通工具）。

2) 对进行能源效率的投资和设备给予补贴和软贷款（即贴息贷款）。

4. 财政措施

1) 税收抵免。

2) 加速折旧。

3) 依据税收的类型（进口、增值税、购买、汽车年检）和设备的类型（器具、汽车、灯具）降低对能源效率投资的税收。

5. 跨领域措施

1) 创新通信技术。

2) 自愿协议。

为了衡量能源效率政策的有效性，人们进行了大量的实践。例如，IEA 评价了当前能源效率的最新政策，强调了其长处和可以继续改进的领域（见表 1.1 和表 1.2）。

表 1.1 IEA 成员国在建筑、工业和交通部门实行的能源效率政策的优势和创新之处^①

建筑	一些欧盟国家对建筑许可的全面实施
	促进绿色建筑的政策
工业	建筑条例中对能源效率的规定
	所有国家对工业能源全面统计
	促进能源管理的政策
交通	对于中、小企业的特殊政策
	对于热电联产、高效节能电动机的政策
	针对轮胎滚动阻力的政策
	对于照明和重型汽车（只在日本）的燃料效率标准
	生态驾驶政策
	促进购买能源效率更高、环保新型汽车的废旧汽车回收方案

^① IEA, Implementing Energy Efficiency Policies（能源效率政策的实施），2009，第 23 页。

表 1.2 IEA 成员国在建筑、工业和交通部门实行的能源效率政策的挑战和有待提高之处^①

建筑	针对建筑制定更高能源效率规定
	加强支持绿色建筑和零能源建筑
	进一步推进节能窗和玻璃嵌装行业
工业	建立措施来优化电动机驱动系统中的能源效率
交通	制定帮助中、小企业的政策和措施
	确保已计划的政策中对燃料效率标准的实施
	制定重型汽车的燃料效率标准

^① IEA, Implementing Energy Efficiency Policies（能源效率政策的实施），2009，第 33 页。

尽管拥有巨大的潜力，能源效率政策^①实施起来也很困难。这是为什么呢？能源效率面临着无处不在的障碍，包括缺乏取得投资资金的渠道、信息缺乏和没有体现在能源价格上的额外开销。此外，在当前经济危机情况下，实施能源效率最大化政策也面临着巨大的挑战。能源效率项目必须与其他优先考虑领域（如就业、健康和社会安全）竞争资金支持。

1.1 标准

如上所述，能源效率的成功面临着障碍。这些障碍包括：缺乏节约潜在能源的意识；在信息和量度方面有效工作的不充分；专注于独立部分而不是整体系统的能源生产和消耗的趋势；分开的激励和专注于最低初成本而不是生命周期成本的趋势。制定标准可以帮助解决这些障碍。这些标准可以提供共性措施和测试方法来评价能源的使用和由于运用新技术、新流程所带来的能源消耗减少情况，同时也能提供一种方法，用于整理对有效使用能源和节能的最好实践和管理过程。

此外，标准可以提供设计对照表和指南，可以用于新系统的设计和旧系统的改造。这些标准可以提供标准的计算方法，因此在特定的情况下可以进行不同选择的合理比较，它们也可以帮助提高基础设施的适应性，以便集成新技术和增加互操作性。

下面的内容是对现有的节能标准的一个概述^②。

1.1.1 ISO

国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）在能源效率方面的工作开始于 2007 年 7 月，国际标准化组织的能源效率与可再生能源委员会（Council Task on Energy and Renewable Energy Sources）确认了对节能和温室气体排放的减少有着最大潜力的 5 个优先领域，即：

- 1) 计算方法。
- 2) 能源管理标准。
- 3) 生物燃料。
- 4) 改造和翻新。
- 5) 建筑。

根据能源效率与可再生能源委员会的要求^③，技术管理委员会（Technical Management Board, TMB）花费了两年时间对能源效率和再生能源资源^④建立了战

① 值得一提的是关于能源效率政策和规程有很多质疑，认为这些能源政策和规程是没有根据的，甚至是失败的。IEA 提议发表一篇文章分析能效质疑的汇编、分类和评价。

② 这个概述在考虑标准化的情况下，直接从系统方法的角度分析能源效率。

③ 解决方案 28/2007。

④ ISO 技术管理委员会解决方案 22/2008。

略顾问集团 (Strategic Advisor Group, SAG)。SAG - E 被要求为技术管理委员会提供关于优先标准和行动的指导和指导, 包括促使利益相关方与其他国际组织合作、协调 ISO 和 TC 等的关系。这个目标是想加快在此领域的标准化设计, 以便满足项目公共政策目标和服务需求。

SAG - E 写了一篇详细的报告, 提供了由技术管理委员会批准的 66 个建议。SAG - E 的工作之后又延长了 3 年。

1.1.1.1 ISO 50001

2008 年 2 月, 基于具体实践和已经存在的国家或区域标准, ISO 技术管理委员会成立了一个新项目委员会, 即 ISO/PC24, 能源管理^①。

ISO 5001 将为工商业设施和公司建立国际框架, 以管理能源相关情况, 包括能源的取得和使用。历时两年, 经过 4 次委员会会议之后, 2011 年 6 月出版了相关文件, 并于 2011 年 10 月被 CEN 和 CENELEC 作为 ISO EN 50001 采用。这些标准是为了给组织和公司整合能源效率和管理活动提供被认可的框架。

ISO 50001 将为组织和公司提供技术性和管理性策略以提高能源效率、减少费用、提升环境保护能力。

1.1.1.2 ISO/IEC JPC 2

在 2009 年, 国际标准化组织和国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 成立了一个联合项目委员会, 即 ISO/IEC JPC 2, 能源效率和可再生能源资源—共性技术, 该技术的首要目标是建立一种标准。在考虑到了 ISO 和 IEC 技术委员会在特定领域的、已经制订的术语的基础上, 这个标准将明确一些跨领域概念中关于能源效率和可再生能源资源的术语和定义。

该联合项目委员会在 2010 年的第一次 ISO/IEC JPC 会议上建立了 3 个工作组:

- 1) 工作组 1, 能源效率: 概念和图表, 由美国的 ANSI 来协调。
- 2) 工作组 2, 从已存在的参考文献中的数据输入, 由瑞典 SIS/SEK 来协调。
- 3) 工作组 3, 可更新能源资源—术语和定义, 由法国 AFNOR 来协调。

2001 年 10 月开始实施委员会草案 (Committee Draft, CD)。

1.1.2 IEC

IEC 对于能源效率的观点在白皮书《Coping with the Energy Challenge》^②中可观其大概。这个由 IEC 市场战略委员会 (Market Strategy Board, MSB) 起草的文件详细制定了未来 30 年的全球能源需求和潜在解决方法以及 IEC 在面临这些挑战时所扮演的角色。

IEC 认为, 必须考虑一种系统的方法以应对能源效率挑战, 这个方法顾及产生、传输、消费能源等所有方面。IEC 也认为评估能源效率的测量程序和方法必须

① ISO 技术管理委员会解决方案 15/2008。

② <http://www.iec.ch/smartenergy1>。

被逐一明述,以合理地评定潜在的改进之处、优化技术性问题 (Best Available Technology, BAT)。

1.1.2.1 SG1 能源效率和可再生资源

IEC 于 2007 年开始成立了附属机构,向它的管理委员会提供决定其未来技术工作的策略问题的建议。其中成立的附属机构 SG1 主要负责能源效率这一特定领域。

SG1 成立于 2007 年年初,其任务包括:

- 1) 分析能源效率和可再生能源领域的现状 (已存在的 IEC 标准,正在进行的项目)。
- 2) 确认 IEC 能力范围内新工作的不足和机遇。
- 3) 设立产品和系统的电能效率目标。
- 4) 规划未来措施的建议。

从此之后,来自 IEC 内部其他团体和 IEA、CIE 等其他组织的专家在会议上展示了他们在能源效率和可再生资源方面的活动和成果,并进行了讨论。

SG1 工作的主要结果是 34 个建议,这些建议被送给 SMB 和 TC 成员进行评价。

1.1.2.2 SG3 智能电网

在此背景下必须提到的是另一个研究组 (Study Group, SG)。这个研究组与能源效率有关:SG3 智能电网。建立于 2008 年的 SG3 为智能电网领域提供建议,这些想法和建议很可能为新国际标准和 IEC 在智能电网领域技术委员会提供基础。

SG3 为智能电网方面的所有技术委员会开发了框架、提供了技术指导^①,并且发展了覆盖互用性、传播、分布、测量、联络客户和网络安全标准的智能电网发展战略蓝图。

1.1.2.3 SG4 高达 1500V 的低压直流分配系统

SG4 建立于 2009 年,其目的在于运用一个全球的、系统的方法以对运用 LVDC 的区域进行合作和协调,这些区域如绿色数据中心、商业大楼、移动设备的电能储备 (使用电池)、电动汽车等,包括所有使用电池的移动产品、使用电子供应单元的照明、多媒体、信息与通信技术 (ICT) 等。

SG4 是一个并不是直接针对能源效率的例子,但是其具有提高能源效率的潜质。

1.1.3 CEN 与 CENELEC

CEN 与 CENELEC 作为最积极主动的标准化组织,于 2002 年开始分析能源效率领域的标准化所带来的挑战,并且详细制定了普遍的策略。

另一个有意思并且有价值的方面在于,CEN 和 CENELEC 决定一起开始这项活动,因此实施一个集成系统的方法十分重要。

① http://www.iec.ch/smartgrid/downloads/sg3_roadmap.pdf。

CEN – CENELEC BT 合作工作组，即能源管理，于 2002 年年初建立，起草了一个欧洲共同的关于能源效率标准化改进的总体策略，还有在 CEN – CENELEC 所有成员中就所需达到的目标达成共识。

这个工作组在 2002 ~ 2005 年充当着 CEN 和 CENELEC BT 的咨询小组，这个咨询小组为关于能源效率领域标准化方面的、政治策略上的事件提供建议。这项工作的主要结果被系统地总结在一篇报告上[⊖]，这篇报告对能源管理领域规范化的建议进行了综述[⊖]。这个文件仍是 CEN 和 CENELEC 在能源效率领域进行规范化活动的基础。

涉及能源效率规范化的重要的技术主体见表 1.3，最重要的标准化活动见表 1.4。

表 1.3 CEN – CENELEC 在能源管理和能源效率标准化领域的合作工作组

技术主体	工作范围
合作工作组 1 能源审查	
合作工作组 2 来源保证和能源认证	来源保证的标准化：贸易、电力的揭露和示踪、CHP、能源认证
合作工作组 3 能源管理和相关服务—普遍要求和资格程序	详细制定关于能源管理和相关服务领域的欧盟标准： • 能源管理系统：定义和要求 • 能源服务公司（ESCO）：定义、要求和资格程序 • 能源管理者和专家：角色、专业要求、资格程序
合作工作组 4 能源效率和节能计算	计算能源消耗、能源效率和节能普遍方法的标准，通用测量方法和认证协议的标准，能源使用指示方法的标准

表 1.4 CEN – CENELEC 在能源管理和能源效率领域的标准和项目

出版物/项目	名称
EN 16001；2009（pr = 22320）	能源管理系统—带着使用指导的要求
EN 15900；2010（pr = 22416）	能源效率服务—定义和要求
prEN 16247 – 1；2011（pr = 23294）	能源查核—第 1 部分：普遍要求
prEN 50XXX（pr = 23227）	关于能源的来源保证书—电力来源的保证
prEN PT EEB Doc；2010（pr = 23079）	能源效率的基准测试方法
EN ISO 50001；2011（pr = 23639）	能源管理系统—带着使用指导的要求
prEN 16212；2010（pr = 23138）	能源消耗、能源效率、能源节约在计算方法上的、自下而上和自上而下的标准

1. 1. 3. 1 SFEM

为了响应 CEN – CENELEC BT 联合工作组能源管理的建议，CEN 和 CENELEC

⊖ [http://www.cen.eu/cen/sectors/Sectors/Utilities And Energy/Forum/Documents/BTN7359 Final Report JWG pdf.](http://www.cen.eu/cen/sectors/Sectors/Utilities%20And%20Energy/Forum/Documents/BTN7359%20Final%20Report%20JWG.pdf)

⊖ A 层次——直接实施；B 层次——在标准化之前需要进一步调查或者进行研究；C 层次——需要从战略意义上进行系统讨论，比如政策问题。

已经建立了一个横向组织结构，致力定义一种普遍策略来规范化能源管理和能源效率领域的“能源管理部门论坛（SFEM）”。SFEM 是一个为利益相关者分享信息和经验的平台，一个确定能源部门关于规范化优先考虑的事件的平台。

成立 SFEM 的目的：

1) 保持和扩大合作伙伴网络，尤其对于新成员而言。这个网络创建于 CEN/CENELEC BT 联合工作组“能源管理”存在期间。

2) 发起进一步调查，评估在哪个领域、哪个项目需要进一步标准化的工作，包括被 CEN – CENELEC BT 联合工作组“能源管理”认定为优先级为 B 或者 C 的项目。

3) 协调欧洲标准化组织正在开展的能源管理相关的活动。

4) 组织 CEN 和 CENELEC 在能源管理部门对欧洲立法和欧洲总策略做出反应。

5) 维持信息、经验和推动能源管理积极性的调查，尤其是在不同国家或者欧洲范围之内。

SFEM 每两年举办一次会议，并不进行标准化活动，也不向 CEN 和 CENELEC 提出进一步动作的建议。CEN 和 CENELEC 通常是建立起有着特定工作范围的、专门的技术主体（通常是联合工作组）。

深入阅读材料

H. Geller and S. Attali, The experience with energy efficiency policies and programmes in IEA countries. Learning from the Critics, IEA Information Paper, 2005.

IEA, *Implementing Energy Efficiency Policies*, 2009, OECD/IEA, Paris.

WEC, WEC: *Energy Efficiency: A Recipe for Success*, 2010.

第 2 章 电缆和线路

Paola Pezzini 和 Andreas Sumper

在电能分配系统中，电力输送容量直接由工作电压和能够传输的最大电流的乘积所决定。工作电压是固定值时，如果导体传输的是电流，系统在给定电压下的输送容量取决于导体的容量。

电缆系统的输送容量被称为载流量^[1]，计算载流量时需要考虑稳态和瞬态两种过程^[2]。由于电缆与其周围的媒介相互作用，对空中电缆和地下电缆的计算有略微不同。对空中电缆载流量的计算需要考虑太阳辐射和电缆安装区域的风量。对地下电缆载流量的计算则要考虑电缆安装处的土壤。

由于绝缘性能和电缆尺寸是相互独立的参数，与它们的热传导方程有关系，载流量计算需要热传导方程的求解结果。在给定电流负荷下，电缆载流量计算决定于导体的温度。载流量额定值与导体的尺寸直接成比例：导体的尺寸越大（越低的焦耳损失），载流量越高。另一方面，绝缘要求取决于工作电压，绝缘要求直接影响载流量值：高绝缘要求（低热损失）意味着低载流量。影响载流量值的参数是电缆的类型和数目、包围电缆的介质（空气、土壤）的热阻抗、掩埋电缆的掩埋深度以及系统中电缆的水平距离。导体电流与温度之间的明确关系引出了对传输电流时产生的热量如何消失的研究。基本热传递方程的求解是计算电缆额定值和电缆载流量的第一步，这些解答主要取决于损耗过程的效率和对绝缘温度的限制。

要获得最佳电缆尺寸，现在的技术标准并不足够。事实上，从热传递方程的结果中得到的最小可接受的部分并没有考虑电缆寿命期间呈现的损失消耗。因此，电缆尺寸的选择需要考虑初始投资和电能损耗费用：电能损耗费用可以通过估计负荷增加和能量价格来计算。若能量消耗的未来费用的总和以及购买和安装的初始费用被最小化，则能得到导体的最经济尺寸。与购买费用的增加相比，用这种方法，总体费用的节约来源于运行费用的减少。

2.1 热传递原理

在此介绍热传递原理的综述是因为负荷电流和导体温度是紧密相连的。在给定导体材料和给定负荷下，必须计算电缆系统产生的热量和其消耗速率，以此来决定特定电流负荷下的导体温度或者决定在给定导体温度下的可容许负荷电流。

不同的机制被用来解释不同介质下热量是如何传播的，这三种机制是传导、对

流和辐射。

2.1.1 传导

对于热传导，用于解释相互接触的两媒介之间的热传递的速率方程是傅里叶定律，即

$$Q = - \frac{1}{\rho} A \frac{d\theta}{dx} \tag{2.1}$$

在 x 轴方向的热动力由 $Q(W)$ 表示，它直接与温度斜率 $\frac{d\theta}{dx} \left(\frac{K}{m} \right)$ 成比例。对于给定温度分布，这个斜率显示了温度改变的方向和速率： $\theta(x) (K)$ 。 $A(m^2)$ 是热交换出现的区域， $\rho \left(\frac{Km}{W} \right)$ 是热电阻率，热电阻率是材料传输质量特性。方程的负号表示热传输的方向是降低温度的。

传导这种机制在掩埋电缆的情况下更加重要，这时的导体与其他金属部件和绝缘材料相接触。

2.1.2 对流

对流是两种不同机制同时作用的结果：由于分子运动的存在而导致的热传导以及流体运动导致的热传递。用来描述对流的方程是牛顿定律：

$$Q = hA(\theta_s - \theta_{amb}) \tag{2.2}$$

对流热动力 $Q(W)$ 与表面温度 θ_s 和周围温度 θ_{amb} 之间的温差成比例。 $\theta_{amb} A(m^2)$ 是表面温度交换的区域， $h(W/Km^2)$ 是对流热传递系数。

根据流体运动，对流可以分成两类：强制对流和自由对流。当流动是由外部方式造成时，则为强制对流：风力、泵或风扇。后者则产生于温度变化所造成的密度差。对于空中电缆，必须考虑对流因素，热对流系数 h 是需要计算的最重要的参数。表 2.1 展示了 h 系数的典型变化范围。

表 2.1 热对流系数值的范围 h

机制	热系数 $h/(W/Km^2)$
自然对流	5 ~ 25
强制对流	
气体	25 ~ 250
液体	50 ~ 20000
沸腾和凝结	2500 ~ 100000

2.1.3 辐射

通过辐射传递能量是所有物质的特性，这不需要介质。辐射以电磁波的形式传播，能够在真空中传递能量。发射的热动力遵循斯特藩—玻尔兹曼（Stefan – Boltzmann）定律：

$$Q = \varepsilon A \sigma_B \theta_s^{*4} \tag{2.3}$$

热动力 Q 与表面积 $A(\text{m}^2)$ 和绝对温度 θ_s^* (K) 成比例, σ_B 是斯特藩—玻尔兹曼定律的常量 $\left[\sigma_B = 5.67 \times 10^{-8} \left(\frac{\text{W}}{\text{K}^4 \text{m}^2} \right) \right]$, ε 是发射率——表面的辐射特性。与理想散热器相比, 发射率是表面发射的效率, 其值的变化范围是 $0 \leq \varepsilon \leq 1$ 。

若是表面产生辐射, 根据辐射特性, 也就是所谓的吸收率 $\alpha (\text{W}/\text{K}^4 \text{m}^2)$, 一部分能量会被吸收, 如下式:

$$Q_{\text{abs}} = \alpha Q_{\text{inc}} \quad (2.4)$$

式中 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

电缆吸收、释放辐射, 因此为了确定净获率, 要运用下式:

$$Q = \varepsilon A_r \sigma_B (\theta_s^{*4} - \theta_{\text{amb}}^{*4}) \quad (2.5)$$

对于空中安装的电缆系统来说, 对流必须被考虑, 最后应用的公式为

$$Q = h A_c (\theta_s - \theta_{\text{amb}}) + \varepsilon A_r \sigma_B (\theta_s^{*4} - \theta_{\text{amb}}^{*4}) \quad (2.6)$$

式中 A_c ——对流的表面积 (m^2);

A_r ——辐射的表面积 (m^2)。

2.2 架空电缆的额定电流值

电缆的额定电流值的计算使用了四个主要值: 可容许的温度提高、导体电阻、损失和热电阻率。然而由于电缆设计和材料的不同, 一些数据会变化, 所以需要依据国际标准。另外, 如后面将要提到的, 与工作条件相关的数值可能因国家不同而不同。

就架空交流电缆而言, 允许额定电流值为^[3]:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0.5} \quad (2.7)$$

式中 $\Delta\theta$ ——导体在周围温度的基础上的允许温度升高 [K];

W_d ——单位长度每相的介质损耗 (W/m);

n ——电缆中导体的数目;

R ——最大工作温度下的交流电阻 (Ω/m);

T_i ——热敏电阻 (Km/W), 更确切地说: T_1 是护套和导体之间每芯的热敏电阻, T_2 是护套和装甲之间的热敏电阻, T_3 是外设的热敏电阻, T_4 是周围介质的热敏电阻。

为了评估损失, 几项数据被考虑其中: 交流电阻、介质损失、护套、屏蔽层损失、装甲、强化和钢管损失。在这里, 只有交流电阻和介质损失被讨论到, 进一步对于其他几项的讨论在 IEC 60287-1-1^[3] 上提及。考虑到其最大工作温度, 单位长度的交流电阻由下式给出:

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \quad (2.8)$$

式中 R ——最大工作温度下的导体交流电阻 (Ω/m);

R' ——最大工作温度下的导体直流电阻;

γ_s ——趋肤效应因素;

γ_p ——邻近效应因素。

这些数据的估算可以由 IEC 60287-1-1^[3] 给出。当电缆传输交流电时, 其电阻比传输直流电时高, 主要是因为趋肤效应和邻近效应、滞后作用、铁磁材料的涡流损耗、非铁磁材料短路时的感应损失^[2]。除非是特高压电缆的情况, 否则通常只考虑趋肤效应和邻近效应。

单位长度每相的介质损失由下式给出:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (2.9)$$

式中 $\omega = 2\pi f$;

C ——单位长度的静电容量 (F/m);

U_0 ——对地电压 (V)。

对交流电压应用纸质或者固体绝缘将导致充电电流流动, 这是因为绝缘体起了大电容器的作用。每当电流方向改变时, 电子将重新排列, 这将消耗一定的功以产生热, 因此导致了实际电能的损失, 即介质损失^[2]。

从式 (2.9) 中可以看出, 介质损失取决于电压, IEC 60287-1-1^[3] 中的表 3 给出了常见绝缘材料的 U_0 的值, 式中其他关于介质损失的数据也能在该表中找到。

最后要讨论的是电缆的内部和外部热电阻。电缆单位长度的热电阻 T_1 、 T_2 、 T_3 被分别整理。对于单芯电缆来说, 护套和导体之间每芯的热电阻 T_1 见下式:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_1}{d_c} \right] \quad (2.10)$$

式中 ρ_T ——绝缘体的热电阻率 (Km/W);

d_c ——导体的直径 (mm);

t_1 ——护套和导体直径的绝缘厚度 (mm)。

用于绝缘的材料的热电阻率在 IEC 60287-2-1^[4] 的表 1 中给出。在一部分国际标准中, T_1 的公式是针对铠装电缆、三芯电缆、充油电缆以及 SL、SA 型电缆的。SL 和 SA 型电缆是径向场单芯金属保护套电缆, 此种电缆由静电胶带作为绝缘屏蔽层。SL 型电缆以铅为护套, SA 型电缆以铝为护套^[5]。

有着常见金属护套的单芯、双芯、三芯电缆护套与铠装之间的热电阻用 T_2 表示, 其公式如下:

$$T_2 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_2}{D_s} \right] \quad (2.11)$$

式中 D_s ——护套的外直径 (mm);

t_2 ——基座的厚度 (mm)。

对于 SL 和 SA 型电缆，其公式将由 IEC 60287-2-1^[3] 给出。

外部护套的热电阻 T_3 ，对于同心层形式的外部服务，其公式如下：

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right] \tag{2.12}$$

式中 D'_a ——铠装外部直径 (mm)；

t_3 ——设备的厚度 (mm)。

波纹状护套和管式电缆热电阻将在 IEC 60287-2-1^[4] 中进一步研究。

当考虑到免受太阳直接辐射电缆和受太阳直接辐射电缆不同情况时，对外部热电阻 T_4 的估计会改变。对于第一种情况来说，公式如下：

$$T_4 = \frac{1}{h\pi (\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}} D_e^*} \tag{2.13}$$

式中 D_e ——有波纹护套电缆的外部直径 (mm)；

h ——散热系数 (见参考文献 [4])。

国际标准也提供了计算 $\Delta\theta_s$ 的方法， $\Delta\theta_s$ 是在周围温度之上的电缆表面温度的超出额。对于免受太阳辐射的空中电缆，IEC 60287-2-2^[6] 给出了方法以计算缩减因素。当电缆被安装在其他电缆附近时，这种方法将不能使用，此方法仅限于：

1) 最多有 9 根电缆的方阵；

2) 最多 6 个电路，每个电路由 3 根电缆安装在三头支架上，最多 3 个电路成水平排列或者两个电路成垂直排列。

对于第二种情况来说，对于直接受太阳辐射的电缆，与上述不同之处在于对 $\Delta\theta_s$ 的计算，这些将在 IEC 60287-2-1^[4] 中得到详细描述。

由于国家的不同，对于电缆的具体工作条件也不同，因此参考周围温度和土壤的热电阻率在不同国家会有不同的值。

当国家的表格没有提供值时，IEC 60287-3-1^[7] 将提供标准工作条件。

澳大利亚、奥地利、加拿大、芬兰、法国、德国、意大利、日本、荷兰、挪威、波兰、瑞典、瑞士、英国和美国都有各自的国家值。

对于没有国家值的国家，需要用到表 2.2 和表 2.3。

表 2.2 海平面的周围温度 (单位:℃)

气候	周围空气温度		地下 1m 的周围温度	
	最低温度	最高温度	最低温度	最高温度
热带	25	55	25	40
亚热带	10	40	15	30
温带	0	25	10	20

为完成这部分工作，电缆制造商将给购买者一个详细的信息列表以选择合适型号的电缆。这些信息应该是关于工作条件和安装数据的。

考虑到工作条件，选择合适型号电缆所需要的信息如下：

- 1) 系统的额定电压 U ；
- 2) 三相系统的最高电压 U_m ；
- 3) 照明过电压；
- 4) 系统频率；
- 5) 接地种类；
- 6) 需提供环境条件，例如：
 - ① 海拔，当大于 1000m 时；
 - ② 内部或外部装置；
 - ③ 过度的大气污染；
 - ④ 终端 SF₆ 断路器的使用；

表 2.3 土壤的热电阻率

热电阻率/(Km/W)	土壤条件	天气条件
0.7	非常潮湿	持续性潮湿
1.0	潮湿	正常的降雨量
2.0	干燥	较少降雨量
3.0	非常干燥	极少或者没有降雨量

- 7) 最大额定电流：对于持续性的、周期性的、紧急的、过载的工作；
- 8) 短路电流是否对称，包括相间或者对地的；
- 9) 短路电流可能流动的最长时间。

电缆安装需要的数据可以分为三种：一般数据、地下电缆所需数据和空中电缆所需数据。关于地下电缆所需的数据可以从参考文献 [7] 中找到。对于一般数据，必要信息如下：

- 1) 路线的长度和横截面的形式；
- 2) 布置安排，金属外皮如何相互连接以及接地；
- 3) 特殊铺设条件，例如水中电缆。单独的安装需要特殊的考虑。

空中电缆的要求如下：

- 1) 周围空气温度的最大、最小、中间值；
- 2) 安装的类型；
- 3) 通风装置的细节；
- 4) 是否直射阳光；
- 5) 特殊条件，例如火灾危险。

2.3 经济因素

在选择电缆尺寸时，电缆寿命期间的损失耗费通常并不计入考虑。实际上，这

种按最小允许截面的选择方式可以最小化电缆的初始投资，但它没有考虑电缆的整个生命周期的开支。因此，应该通过评估负荷的增长和能量损耗来最小化初始投资和运行费用（见 IEC 60287 -3 -2^[8]），将两者综合考虑最终确定经济的电缆截面。

购买和安装费用与能量损失等运行费用相结合，组成了一个便于比较的经济价值，在后面将被简写为“cu”。设备购买日期被认为是“当前”，运行费用必须转化为等值的“当前价值”。为了达到此目的，应用了折扣过程，并使用了贴现率与借款费。独立设备的当前条件和经济约束影响运行费用的当前值计算。为了得到此值，为负荷的未来发展、年增长的 kWh 值、电缆经济生命周期的年贴现率选择合适的值是十分必要的。

有两种方法来计算电缆的经济尺寸。首先，对于特殊安装，需要计算出每个导体的尺寸、经济电流额的范围。然后，需选择一个其经济范围包含负荷需要的值。第二种方法更适合单独设备：计算对于所需负荷的最优横截面区域，选择最接近标准导体的尺寸。当寻找导体的最佳尺寸时，并不仅仅考虑经济因素。其他需要考虑的因素顺序如下：

- 1) 计算经济的横截面区域。
- 2) 检查计算的尺寸是否能够承担预期的最大负荷、是否考虑到温度限制。
- 3) 检查短路和接地故障电流。
- 4) 检查电压降限制。
- 5) 考虑其他可能影响安装的标准。

最后，需考虑设备的供应质量。

2.4 电流额定值计算：总体费用

找出电缆最优尺寸的第一步是表达出在其经济寿命期间，安装、操作一根电缆所需的总体费用。所有费用都应表达在当前值中，显示整体费用（CT）的方程如下：

$$CT = CI + CJ \quad (2.14)$$

式中 CI——电缆安装费用；

CJ——焦耳损失当前值的等价费用。

2.4.1 CJ 估计

CJ 是焦耳损失带来的费用，由两部分组成：损失能源的费用与提供额外传输所损失的电能容量相关费用。

损失能源的费用（CE）的计算要考虑第一年的首次能源损失（EL）（Wh），如下式：

$$EL = (I_{\max}^2 R / N_p N_c) T \quad (2.15)$$

式中 $I_{\max}$ ——电缆第一年期间的最大负荷；

R ——考虑到趋肤效应、邻近效应和金属外皮与铠甲的损失时，导体的交流视在电阻；

l ——电缆长度；

N_p ——每个回路的相线数目；

N_c ——携带同值和同种负荷的回路数目；

T ——最大电流 $I_{\max}$ 在实际变化负荷电流下产生同样年损失所需要的年小时数。

最大焦耳损失下的工作时间可由下式给出：

$$T = \int_0^{8760} \frac{I(t)^2}{I_{\max}^2} dt \quad (2.16)$$

式中 t ——小时时间；

$I(t)$ ——时间的函数。

最后，第一年的损失费用由下式表示：

$$CE = (I_{\max}^2 R l N_p N_c) TP \quad (2.17)$$

式中 P ——在相关电压等级下 1Wh 能量的费用。

额外供给容量的费用 (u/年) 如下：

$$CA = (I_{\max}^2 R l N_p N_c) D \quad (2.18)$$

式中 D ——每年用户电费；

u ——任意一种货币单位。

考虑到 CE 和 CA ，第一年的总体费用 (OC) (cu) 是这两者之和，若费用在年底缴清，则总体费用应该在其现在价值上考虑，因此：

$$OC = \frac{(I_{\max}^2 R l N_p N_c) (TP + D)}{(1 + i/100)} \quad (2.19)$$

在 N 年操作期间，当前值的能量费用 (cu)，减去购买日期有：

$$CJ = (I_{\max}^2 R l N_p N_c) (TP + D) \frac{Q}{(1 + i/100)} \quad (2.20)$$

式中 Q ——考虑到负荷增加、 N 年多能量费用的增长以及贴现率 i 的系数，即

$$Q = \sum_{n=1}^N (r^{n-1})$$

$$r = \frac{(1 + a/100)^2 (1 + b/100)}{(1 + i/100)} \quad (2.21)$$

式中 a 和 b ——每年负荷的增加量和每年能量费用的增加量。

总体费用 (cu) 由 CI 和 CJ 的和给出：

$$CT = CI + I_{\max}^2 R l F \quad (2.22)$$

其中 F (cu/W) 由下式表示：

$$F = N_p N_c (TP + D) \frac{Q}{(1 + i/100)} \quad (2.23)$$

2.5 经济导体尺寸的决定

为了评估经济导体尺寸，可以应用两种方法：第一种方法是分析一系列尺寸的导体的经济电流范围；第二种方法是在给定负荷下考虑经济导体尺寸。

2.5.1 经济电流范围计算

在给定的安装条件下，所有导体尺寸都有经济电流范围（A），表现为其上限和下限。对于一个给定导体尺寸，上、下限如式（2.24）所示：

$$\begin{aligned} I_{\text{low}}^{\text{max}} &= \sqrt{\frac{\text{CI} - \text{CI}_1}{Fl(R_1 - R)}} \\ I_{\text{up}}^{\text{max}} &= \sqrt{\frac{\text{CI}_2 - \text{CI}}{Fl(R - R_2)}} \end{aligned} \quad (2.24)$$

式中 CI——考虑到导体尺寸的电缆长度的安装费用（cu），这是一个任意电流单位；

R ——考虑到导体尺寸时单位长度的交流电阻（ Ω/m ）；

CI_1 ——下一个最小标准导体的安装费用（cu）；

R_1 ——下一个最小标准导体的单位长度交流电阻（ Ω/m ）；

CI_2 ——下一个最大标准导体的安装费用（cu）；

R_2 ——下一个最大标准导体的单位长度交流电阻（ Ω/m ）。

2.5.2 给定负荷的经济导体尺寸计算

经济导体尺寸是缩小总体价值函数（cu）的横截面：

$$\text{CT}(S) = \text{CI}(S) + I_{\text{max}} R(S) l F^2 \quad (2.25)$$

$\text{CI}(S)$ 与导体尺寸之间关系的等式可以从已知的标准电缆尺寸费用中得出。导体视在电阻（ Ω/m ）可以表达为横截面的一个函数（见 IEC 60287-1-1）：

$$R(S) = \frac{\rho_{20}(1 + \gamma_p + \gamma_s)(1 + \lambda_1 + \lambda_2)[1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{S} 10^6 \quad (2.26)$$

式中 ρ_{20} ——导体直流电阻系数（ Ω/m ）；

γ_p ——邻近效应，见 IEC 60287-1-1^[3]；

γ_s ——趋肤效应，见 IEC 60287-1-1；

λ_1 ——护套损耗因子，见 IEC 60287-1-1；

λ_2 ——铠装损耗因子，见 IEC 60287-1-1^[3]；

α_{20} ——20℃时特殊导体材料电阻率的温度系数（ K^{-1} ）；

θ_m ——导体温度（℃）；

S ——电缆导体的横截面区域（ mm^2 ）。

对于电缆种类和考虑中的装置，若有一个线性模型能适合安装初始费用值

(cu), 则:

$$CI(S) = l(AS + C) \quad (2.27)$$

式中 A ——与导体尺寸相关的费用的变化成分 (cu/m, cu/mm²);

C ——不受电缆尺寸影响的费用的稳定成分 (cu/m);

l ——电缆长度 (m)。

最优尺寸 (mm) 可由 $CT(S)$ 等式得出:

$$S_{ec} = 1000 \left[\frac{I_{\max}^2 F \rho_{20} (1 + \gamma_p + \gamma_s) (1 + \lambda_1 + \lambda_2) [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)]}{A} \right]^{0.5} \quad (2.28)$$

这部分并不与标准尺寸完全相等, 为了得到最经济的尺寸, 需要计算电缆的最大、最小尺寸。

2.6 小结

为了确定一条电缆能够承受的且不会导致恶化或损坏的最大电流负荷, 需要计算载流量。对于载流量计算和普遍的最小横截面电缆的选择, 其技术标准是必要的。虽然初始费用被最小化, 但是在电缆寿命期间产生的损失的费用并没有最小化。在过去的十年中, 西方国家的能源费用上涨迅速, 更先进的安装材料允许在比以往更高的温度下工作。在电缆生命周期中损失费用和初始费用的总和也需要被最小化, 而不是仅最小化初始费用。

参考文献

- [1] Ranasamy Natarajan, *Computer-Aided Power System Analysis*, CRC, 2002.
- [2] George J. Anders, *Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment*, Wiley-IEEE Press, May 2005.
- [3] IEC 60287-1-1 Electric cables, Calculation of the current rating. Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General.
- [4] IEC 60287-2-1 Electric cables, Calculation of the current rating. Part 2-2: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance.
- [5] George F. Moore, *Electric Cables Handbook*, 3rd edn, BICC Cables, 2004.
- [6] IEC 60287-2-2 Electric cables, Calculation of the current rating. Part 2-2: Thermal resistance – A method for calculating reduction factors for groups of cables in free air, protected from solar radiation.
- [7] IEC 60287-3-1 Electric cables, Calculation of the current rating. Part 3-1: Sections on operating conditions – Reference operating conditions and selection of cable type.
- [8] IEC 60287-3-2 Electric cables, Calculation of the current rating. Part 3-2: Sections of operating conditions, Economic optimization of power cable size.

第 3 章 电力变压器

由于电力变压器可以将电能从一个电压等级变换到另一个电压等级，因此它是供电网络中一个必不可少的部分。电能发电厂产生后需要被传输到终端，从而被用户终端消耗。在较高电压等级下这种传输会有更高的传输效率，这也是为什么在发电厂产生的 10 ~ 30kV 的电压被变压器转换到典型的 220 ~ 400kV 甚至更高的电压之后再进行传输。大型变电所配备有很多变压器，通常这些大型变电所都在靠近大型发电厂的主要传输节点上，这样可以增加传输通道以及与二次输电网络连接的灵活性。在那里安装的变压器和自动变压器也被称为电网低压互连变压器。

由于大部分电力设备在低电压下工作，因此高电压需要被变换回与使用点相近的电压。第一级降压是将电压转换到大部分工厂所需要的 33 ~ 150kV 的电压等级。之后供电公司进一步将电能降压传输到用户使用端。

电能通过这种方式在被最终消耗前将平均经历 4 个阶段。在具有宽范围工作电压的传输配电网中应用了数量庞大的不同等级和型号的变压器。高电压的大型变压器称为系统变压器。最后一级变压把高电压变换成终端用户所使用的电源电压（欧洲为 400/230V），由配电变压器实现。配电公司所拥有和操作的配电变压器负责给终端用户提供低压电的 70% 左右，并且代表着配电变压器容量的 80% 左右。电压等级被分为：

- 1) 特高电压：输电网（ $\geq 150\text{kV}$ ）通常为 220 ~ 400kV（极高的 $> 400\text{kV}$ ）；
- 2) 高电压（70 ~ 150kV）：二次输电（在 TSO 和 DSO 之间）；
- 3) 中等电压（1 ~ 70kV）：通常到 36kV；
- 4) 低电压（ $< 1\text{kV}$ ）：如 110V、240V 和 690V 等。

电力变压器为节约能源提供了很好的契机。人们进行了大量的尝试来评估变压器节能潜力。例如，在 2005 年 Leonardo ENERGY 组织估测仅仅配电变电器全球就有至少 200TWh 的能源节约潜力。

国际能源组织（IEA，<http://data.iea.org>）的统计数据显示，2008 年全球的电能总产量是 20270TWh，其中大约 10%，也就是 2000TWh 是由发电机产生的，其中大部分是可再生的，在非高压（70kV 以下）下这是互相关联的。据报道，能源总消耗是 16816TWh，而损耗是 1656TWh。为了达到平衡，剩下的 1798TWh 被能源工厂本身所消耗。与此同时，全世界发电容量是 4625GW。

深入研究电能传输和分配（T&D）损耗的细目，SEEDT 项目的分析指出，在欧洲 2000 年变压器所产生的 T&D 损耗如下：

- 1) 配电变压器 25%；

- 2) HV/MV 变压器 10% ;
- 3) 传输变压器 10% 。

这一份额也许在过去的十年中有小幅减少，但到目前为止，以下的一些损耗一直没有包括在节能潜力的估测中：

- 1) 发电机变压器；
- 2) 由能源产业本身所用的变压器（为发电厂的设施和辅助设备供电）；
- 3) 分布式能源（DER）变压器，主要将可再生能源整合到输电网中 [包括为了将高压直流电（HVDC）变换到交流电（AC）的换流变压器]。

在世界范围内输电网中所安装的变压器导致了全部 T&D 损耗的 40%，大约有 650TWh。这些估算基于应用以下规则的能源统计：

- 1) 从 2000 年起，由于节能潜力有一些已经实现，欧洲 45% 的变压器损耗已经减少，并且由于限电因素，这一指标比世界的平均水平要高 10%。
- 2) 同时，欧洲的估计并不包括上述变压器的损耗。

将有多少这些损耗可以被节约呢？变压器已经是非常有效的设备了，并且在减少损耗上已经取得了很大的进步。然而，由于在设计和技术上仍然有储备，并且在电力系统中应用如此多的电压变换环节，因此节能潜力仍然比较高。例如，美国和欧洲在变压器的最小能源绩效标准（MEPS）的准备中指出，配电变压器如果应用当前最先进的技术，与目前运行的平均机组对比能够提高能效 1%，比 MEPS 高 0.5%。对于电力变压器，这一差距要小一些，且对比目前水平，传统的技术可以使能效提高 0.1% ~ 0.2%。

平均而言，这对于所有电力网络的变压器可以提升几乎 50%，也就是说可以节省多余 300TWh 的能源。在本章，我们将重点关注配电变压器。

从效果上说，最大的节能潜力就在配电变压器上。它们依然有着最大的节能储备，有着很长的使用寿命，并且损耗的寿命成本占生产成本的比例相当高。大型的电力变压器与配电变压器相比，已经有更高的效率，并且其生产（包括设计和工具）也是不同的。除去其重量、价值和损耗所占的 3/4 指数的比例因子，这些减少了生产成本占损耗的寿命成本的比例，同时也减少了进一步在效率方面取得更多改进的吸引力。然而，这些还是有意义的。见表 3.1，小型变压器比配电变压器和电力变压器效率要低得多，但是它们的容量和有效性因素非常低，以至于它们的使用周期成本对初次投入低的生产单位非常有益，同时可以分析接地变压器而去研究能源相关的产品指令。

表 3.1 不同变压器的典型能源效率

变压器	S/kVA	电流密度/(A/mm ²)	能源效率
微型变压器	0.001	7.000	45.00%
小型变压器	0.100	3.000	80.00%

(续)

变压器	S/kVA	电流密度/ (A/mm ²)	能源效率
工业变压器	40. 000	3. 397	96. 00%
配电变压器	200. 000		98. 50%
整体供电变压器	40000. 000	3. 000	99. 50%
发电机变压器	600000. 000		99. 75%

3.1 变压器中的损耗

变压器损耗主要可以分为两类：无负荷损耗和有负荷损耗。这些类型的损耗在所有的变压器中都很常见，与变压器的应用场合和额定功率无关。然而，还有两种其他类型的损耗：一种是由于非理想状态下的电源质量所造成的额外损耗；另一种更多出现在较大型变压器上的，由一些诸如风扇和水泵等冷却设备所造成的冷却辅助损耗。

3.1.1 无负荷损耗

当变压器被激励（甚至是二次回路打开）时这些损耗将在变压器铁心上产生。它们也被称为铁损或铁心损耗，且是一直存在的。

它们由以下部分组成：

1) 磁滞损耗，由正在被磁化和退磁交替中铁心叠片的磁畴的摩擦运动产生。这些损失取决于制造铁心的物质的种类。硅钢的磁滞性能现象比一般的钢低很多，但非晶态合金比硅钢性能更好。磁滞损耗可以用材料处理方法减少，例如冷轧、激光处理或晶粒取向等。磁滞损耗通常占到超过非负荷损耗的一半以上（50% ~ 80%）。这一比例在过去相对更小些（由于涡流损耗的原因）。

2) 涡流损耗，由包括在铁心叠片中的涡流产生的变化磁场所致，因此要产生热量。可以通过制造薄层叠片铁心减少涡流，进而减少这些损耗，这些层叠片之间通过一层薄漆层达到彼此绝缘。涡流损耗通常占到总的无负荷损耗的 20% ~ 50%。

在变压器的铁心中还有一些不重要的、零散的绝缘材料损耗，它们一般只占到总的无负荷损耗的 1%。

3.1.2 有负荷损耗

这些损耗通常被称作铜损或短路损耗，有负荷损耗随着变压器负荷的变化而变化，它们包括以下部分：

1) 欧姆热损耗。由于这种电阻损耗在负荷损耗中占主导，有时被称为铜损。这种损耗产生于变压器绕组中，由导体电阻所致。这些损耗的量级随着负荷电流的二次方而增加，并且和绕组的阻抗成比例。可以通过增加导体的横截面积或减少绕组的长度来减少。用铜作为导体可以在重量、尺寸、成本和阻抗等方面要求之间达到平衡；同时通过加入附加额以增加与设计限制要求一致的导体直径，从而减少

损耗。

2) 导体涡流损耗。变化的电流产生了磁场，而磁场又产生了涡流。减少导体的横截面积可以减少涡流，所以相互之间绝缘的金属线构成的绞合导线通常用来降低阻抗，从而减少涡流损耗。其实这意味着绕组是由许多平行的绕线构成的。由于每个绕组都有着略微不同的波动，每个绕组所产生的电压也会有点区别，并且将它们的末端相连就可以产生回路电流，这些电流会造成损耗。这种情况可以通过用连续换位导体（CTC）来消除，这里这些金属线频繁换位用于平均通量差且使电压均衡。

表 3.2 给出了一个关于电流密度影响负荷损耗的很好的例子。对于比仅仅 1/4（25%）更高的电流密度，例如少于 1/4 的导体材料，应用的平均值通常为 3A/mm²，将导致差不多双倍的负荷电阻损耗。

表 3.2 导体横截面积对变压器负荷损耗的影响

增加导体横截面积（使用更多的铜）的节能回报（满负荷运行时间）		
电流密度/(A/mm ²)	铜线圈中的具体损耗/(W/kg)	运行时间/h
1. 00	1. 96	1854
1. 50	4. 41	824
2. 00	7. 84	463
2. 25	9. 92	366
2. 50	12. 25	297
2. 75	14. 82	245
3. 00	17. 64	206
3. 50	24. 01	151
4. 00	31. 35	116
4. 50	39. 68	92
5. 00	48. 99	74
6. 00	70. 55	51
7. 00	96. 02	38
8. 00	125. 42	29

3.1.3 辅助设施损耗

这些损耗是由于冷却大型变压器而使用能源运行制冷风扇或泵而产生的。

3.1.4 由于谐波、不平衡和无功功率所产生的额外损耗

这种损耗包括由于不平衡的谐波和无功功率所产生的损耗。

由涡流产生的能量损耗取决于频率的二次方，所以超过 50Hz 频率的谐波的存在会在铁心和绕组中产生相应的能量损耗。这些多余的损耗需要我们给予一定的关注并将在下面讨论。

负荷电流的电抗成分虽然不能产生有用的负荷电能，但却产生了实际的损耗。这些损耗和有功功率的 1/(cosφ)² 成比例，不过这些变压器中的额定功率还是总能

产生一定视在功率。这些无功功率来自于变压器铁心磁化的无功功率和杂散损耗，使供电网络中产生有功功率损失。应该避免低功率因数负荷，用来减少与无功功率有关的变压器中的损耗。

3.1.4.1 谐波

在我们开始讨论变压器中的谐波之前，必须先声明只要电流畸变和绕组上的谐波效应是值得实际考虑的，这就有个不明确的位置。根据一些研究表明，电压谐波和在无负荷损耗上的谐波效应一样，在某些情况下，将会产生大量的变压器额外损耗。

诸如在发动机系统中的变速驱动器、计算机、UPS 系统、电视机、荧光灯等电力电子器件的非线性负荷将在网络中产生谐波电流。谐波电压由谐波负荷电流与网络阻抗产生。由于增加的趋肤效应、涡流、杂散和磁滞损耗，谐波将增加负荷和非负荷损耗。

3.1.4.2 电流畸变

这些损耗中最重要的是绕组中的涡流损耗，它可以非常大，因此大多数的计算模型都会忽略其他的谐波引起的损耗。

负荷损耗中谐波电流精确的影响取决于谐波的频率和变压器设计的方式。总体而言，涡流损耗随着频率的二次方与负荷电流的二次方而增加。所以，如果负荷电流包含着 20% 的五次谐波，由谐波电流导致的涡流损耗将是在基础频率下涡流损耗乘以 $5^2 \cdot 0.2^2$ ，这意味着涡流损耗将会翻番。

为了避免由于谐波电流使变压器过热，通常采用两种方法：

1) 通过变压器减少转移的最大视在功率，通常称作降容。估算变压器所要求的降容，可以计算出负荷的降容因素。这种方法在欧洲使用得比较普遍，是通过估算一个标准的变压器需要被降容多少以保证在谐波损耗中的总损耗不会超过基本的设计损耗。这一额降参数被称为“因子 K ”。

变压器的额定因素通过下式计算：

$$K = \left[1 + \frac{e}{1 + e} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2 \sum_{n=2}^{n=N} \left(n^q \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{0.5} \quad (3.1)$$

式中 e ——基频下的涡流损耗除以由于直流电流产生的损耗，该直流电流值等于正弦电流的方均根值（在参考温度下）；

n ——谐波级数；

I ——包括所有谐波的正弦电流的方均根值，可用下式求得：

$$I = \left(\sum_{n=1}^{n=N} (I_n)^2 \right)^{0.5} = I_1 \left[\sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (3.2)$$

式中 I_n ——第 n 级谐波的大小；

I_1 ——基波电流的大小；

q ——由绕组类型和频率决定的指数常数。对于双绕组都是圆角矩形横截面

积导体的变压器典型值是 1.7，对于低压箔式绕组的变压器典型值是 1.5。

2) 对于非正弦负荷电流开发特殊的额定变压器设计。这一过程需要有分析和最小化绕组中的涡流损耗、计算热点温度上升、层叠铁片独立绝缘和/或增加铁心或者绕组的尺寸。根据劳动效率、生产容量以及工厂和设备的生产能力，每一个生产者都会用全部或者其中的任意一个技术。这些产品也作为“K 标准”变压器。在变压器的选择环节，设计者需要估计出负荷的 K 因子并且选择一个有着相同或者更高 K 因子的变压器。K 因子定义为

$$K = \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} I_n^2 n^2 \quad (3.3)$$

例如，当电流谐波失真系数 THDI = 20% 时，由于负荷电流中高频谐波的存在导致变压器负荷电路中产生额外的损耗将增加大约 4%，这与由电流基波产生的损耗相关。

作为考虑特殊变压器谐波的一个例子，IEC 61378 - 1 标准负责规格、设计、电力变压器测试以及在半导体变换器工厂内打算整合的反应堆；一般而言，它不是为工业或者公共的交流电配电而设计的。这个标准的应用范围仅限于各种额定功率的电力变压器的应用、局域配电、中等额定变压器电压应用，对于工业应用，设备的最高电压不超过 36kV。根据这个标准，这种换流变压器可以使用油浸的或者是干性的设计。油浸变压器要遵守 IEC 60076 标准，干性的要遵守 IEC 60726 标准。注意，EN 50464 标准第 3 部分主要用于有非正弦电流（K 因子）负荷的变压器额定功率的确定。

3.1.4.3 电压畸变

以上提到的一般的方法假设尽管磁化电流不包括谐波，但是与负荷电流以及它们在损耗上的影响相比是非常小的。因此，诸如 ANSI/IEEE C57.110 的标准假设谐波的存在不会增加铁心的损耗。

当不忽略来自电压谐波的额外谐波损耗和在变压器铁心中产生的损耗时，由于谐波的原因而产生于变压器铁心中的损耗可以用下式计算：

$$P_T = 3 \sum_n I_n^2 R_n + P_{Fe} \sum \left(\frac{V_n}{V_1} \right)^m \frac{1}{n^{2.6}} \quad (3.4)$$

式中 P_T ——由于谐波畸变造成的变压器损耗；

P_{Fe} ——基频铁损；

R_n ——第 n 阶变压器的等效铜损；

V_1 ——基波电压；

V_n —— n 阶谐波电压；

I_n —— n 阶谐波电流；

n ——谐波阶；

m ——指数经验值（这里认为值是2）。

式（3.4）中的第二组分代表变压器铁心中由电压畸变造成的损耗。这在一定的程度上是一个经验公式，它也许仍然低估了电流畸变所造成的铁心谐波损耗。

Metglas 是将非晶态金属引入到变压器中的人，他阐述了以下理论。

由于磁滞和涡流损耗分别随着 f 和 f^m 而变化，所以电网中的电流畸变导致了变压器铁心损耗的增加，其中 f 是频率而 m 根据不同的铁心材料从 1.5 ~ 2 变化。普通钢质变压器有相对更大的磁滞和涡流损耗，因此这一情形要比非晶态金属更糟糕。因此，在非晶态金属铁心中和普通硅钢铁心的变压器的中，总损耗的差异随着电力配电线中的高频谐波成分的增加而变大。

表 3.3 列出了普通硅钢和非晶态金属铁心变压器损耗的条目。

在磁路中也会产生损耗，并且它们将会因为电压谐波的存在而增加。它们属于涡流损耗，与高频谐波的频率和铁心中由电压高频谐波造成的磁损耗有关。

首先，它们被忽视的原因是电压畸变的等级，它一般至少比电流畸变低一个数量级。然而，电压谐波增强了不平衡的变压器三角形联结绕组的零序电流的效果，并带来了相应的热损耗。这些损耗造成了额外的辅助负荷损耗。用一个小型变压器进行的实验可以很好地说明这些额外损耗可以多么迅速地达到一个惊人的级别。三角形联结绕组的二次绕组的串联电阻是 0.1Ω 。变压器一次电压总谐波失真仅为 3.2% 时将导致 2.3A 的环路电流，根据 I^2R 损耗大约为 0.5W。0.5W 大约是总铜损的 1%，实际上好像并不算坏。但如果电压总谐波失真升高到了在现实中可能达到的 6.4%，焦耳热损耗将会增加到铜损的 4% 或者说是 4.6A，这种情况下它将占到额定电流的 28%。因此，变压器负荷不得不被减少 28%，用 150Hz 的回路电流以防止二次绕组的过热现象。

表 3.3 无定形氧化硅变压器和硅钢变压器谐波损耗比较
(变压器负荷约为 65% 且总谐波失真为 25%) (单位: W)

	磁滞损耗	涡流损耗	空载损耗	总损失
非扭曲无定型变压器	99	33	966	1098
扭曲无定型变压器	99	74	1553	1726
非扭曲硅钢变压器	155	311	1084	1550
扭曲硅钢变压器	155	698	1671	2524

现在，我们再来讨论一下电压。有一些特殊情况，电压畸变过大以致对工作着的变压器性能造成有害的影响。例如，它是小型的 UPS 系统（换句话说，其他的替代品太贵了）的一个“固有特性”，当产生电能损耗时，它们将产生一个方波，而不是正弦电压。然而，非步进的方波有一个比正弦波形少 11% 的波形系数。这 11% 就是一个平均值和 RMS 值相关的系数。应用的一般是 RMS 值，或者至少应该是 RMS 值。但是磁化的等级取决于平均值。在小型 UPS 的输出端正确的 RMS 值可

以导致变压器输出显著过激励给与它连接的设备。此外，一个方波的谐波畸变非常高以至于产生非常大的无负荷损耗。

3.1.4.4 额外谐波损耗的减轻

尽管变压器的降额之前已讨论过，但是如果不同矢量组的变压器安装在这个系统上，谐波的效果还是可以被减轻的。由于不同的相移，这些变压器将使不同相角的谐波相互抵消。而且，在三角形联结和星形联结的绕组中 Z 形变压器有着相同的电压，这将会使得谐波效应最小化。不幸的是，这一措施在配电网中很少被使用，因为配电网的操作者用相同矢量组，通常是 Dyn5 或 11 去保持一个变压器并行运行的选择。此外，变压器容量的标准化和可互换性也与应用不同的矢量组相悖。

3.1.4.5 非平衡性

有着逆序电压的变压器将它们用正序电压一样的方式转换。和单极的电压相连的行为取决于一次和二次连接，更加特别的是中性导体的存在。例如，一边有三相四线的连接法，中性线电流可以流通。如果在另一边，绕组三角形联结，单极电流会被变换成三角形联结的循环（和热引起的）电流。相关的单极磁通将会穿过变压器的装配部分，在诸如水箱之类有时需要一些降容的地方导致寄生损失。由于不平衡造成的指示性的额外谐波损耗已经列在了表 3.4 中。

表 3.4 变压器中的不平衡损耗

中性线电流和平均相电流的比值	变压器的额外损失（%）
0.5	6 ~ 8
1.0	15 ~ 20
1.5	35 ~ 50
2.0	70 ~ 90
3.0	150 ~ 200

3.2 效率和负荷因数

所呈现的效率反映变压器的运行状况（是否带有负荷），很重要的一点就是变压器的负荷。当有负荷损耗和无负荷损耗相等时，变压器的效率最高，这从下式中得出。

增量损失和电能的比例应该是最小值：

$$\frac{\Delta P}{S} = \frac{\Delta P_0}{S} + \frac{\Delta P_k}{S} = \frac{\Delta P_0}{S} + \frac{\Delta P_k \left(\frac{S}{S_n}\right)^2}{S} = \frac{\Delta P_0}{S} + \frac{\Delta P_k}{S_n^2} S \tag{3.5}$$

式中 ΔP ——损耗增量；

P_k ——带有负荷；

P_0 ——不带负荷；
 S ——瞬时功率；
 S_n ——额定的。

最小值可以通过导数计算出。上述比率的一阶导数是 0，而二阶导数是正数，所以最优能量可以由下式得出：

$$S_{\text{opt}} = S_n \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} \tag{3.6}$$

实际上，两种损耗相等时变压器的最优效率是在变压器负荷的 25% ~ 50% 之间。式 (3.6) 指出怎样可以容易地得到变压器达到最高效率时的负荷值。例如，如果无负荷损耗和有负荷损耗的比率是 1/4，那么 0.25 的二次方根是 0.5，这就表示负荷在 25% ~ 50% 之间可以达到最优效率。

图 3.1 是有负荷（Cu）和无负荷（Fe）损耗的比例不同的两个变压器的例子。

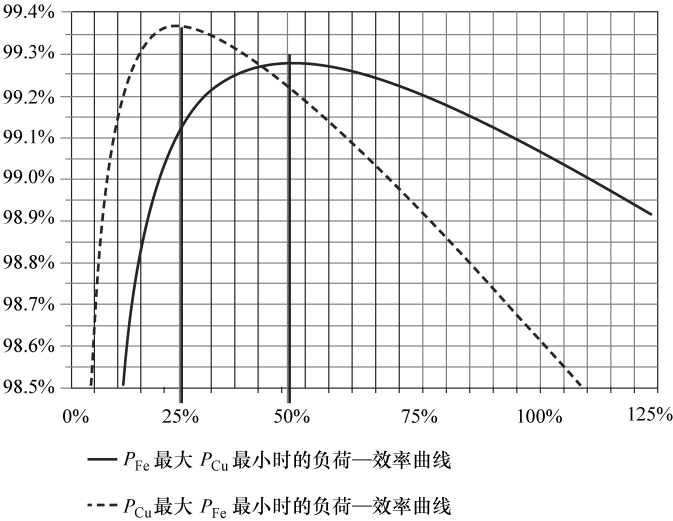


图 3.1 变压器负荷—效率曲线

表 3.5 比较了不同变压器带 100% 和 50% 负荷时的损耗和效率。

表 3.5 变压器在 50% 和 100% 负荷时的损耗和效率

变压器类型	效率				损耗	
	额定功率	100% 额定	50% 额定		100% 额定	50% 额定
		负荷	负荷		负荷	负荷
	MVA	%	%		kW	kW
发电机变压器	1100	99.60	99.75		4400	1375
旁路母线变压器	400	99.60	99.75		1600	500
变电站变压器	40	99.40	99.60		240	80
配电变压器	1	98.60	99.00		14	5

3.3 损耗和冷却系统

以热形式存在的变压器损耗必须从变压器的内部排到外部。空气、气体或液体可以起到绝缘介质和冷却剂的作用。然而，冷却可以是自然的或由风扇或水泵强制的冷却。冷却剂和冷却液的强制流动是影响变压器效率的重要方面。变压器遵循着一些和它们的尺寸有关的物理规则，这些关系可以用下式表示：

$$\frac{\text{参数}_2}{\text{参数}_1} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^x \quad (3.7)$$

式中 参数₂ 和参数₁——变压器 2 和 1 的被选参数；

S_2 和 S_1 ——变压器 2 和 1 的视在功率；

x ——指数，理论上对于变压器的宽度、长度和高度的每一项都是 $x = 1/4$ ，因而对于体积是 $3/4$ 。

变压器的体积基本上和质量是成比例的，体积的增加比电能生产能力小，或者反过来说，电能密度随着额定功率的增加而变大。

主要负责散热的变压器表面增加得更少，对于每一个尺寸（长、宽、高），这个指数都是 $2/3$ ，因此对于额定功率就是 $2/3 \times 3/4 = 1/2$ ，而重量（包括活性材料部分）和损耗之间有个 $3/4$ 的指数关系。

很明显，相对较大的变压器需要额外的冷却。第一步是将液体冷却物引入变压器绕组。进一步的冷却可以通过增加变压器的冷却表面的面积得到。这种类型的冷却被称作 ONAN 冷却（油自然的、空气自然的循环）。强制冷却用于额定功率在 40MVA 以上的变压器中。这种冷却被称作 ONAF 冷却（油自然的、空气强制的循环），通过用风扇把冷却空气吹进油散热器之间的方法，液体冷却效果得到增强。

在 400MVA 以上，用水泵去辅助油冷却剂的循环很有必要。这种冷却形式缩略语为 OFAF，代表“油强制的、空气强制的循环”。在额定功率超过 800MVA 的变压器中，仅仅通过油循环冷却的方法就不够了，这些变压器用 ODAF 冷却（油直接的、空气强制的冷却），其中冷却油直接射入变压器绕组的油路。

3.4 能效标准和规则

变压器中的能效由标准和能量政策法律文件支持。标准是国际性或国家级的文件，既包括损耗测试、公差等测试，还对包括寿命成本、有/无负荷及降低谐波等变压器应用进行指导。

政策法律文件更多用于支持诸如能效之类的主要目标，它们可以包含以下部分：

- 1) 自愿的或是强制的最小能耗标准；

- 2) 标识;
- 3) 有义务或是由证书给予的奖励措施;
- 4) 其他财务、财政奖励;
- 5) 信息和动力;
- 6) 为购买者提供工具套装;
- 7) 能量建议/审计;
- 8) 合作手续;
- 9) 支持 R&D 及试点或演示项目。

尽管强制的法规保证了最有力的增强,但是值得重点强调的是能源政策经常是各种法律文件的混合。法规通常被称为 MEPS (最少耗能标准),对于变压器的法规在许多国家中演变了数十年。除了中国和欧洲的 MEPS 提案是针对非配电变压器的之外,这些法规都覆盖了配电变压器,包括油浸式和干式变压器。

国际上主要的参考标准是 IEC 60076,电力变压器系列。与 IEC 60076 - 1 (2000) 等效的 IEEE 标准是 IEEE C57.12.00 (2006)。IEC 60076 提供了变压器使用的海拔、环境温度条件的具体要求:

- 1) 在 IEC 60076 - 2 中的油浸变压器;
- 2) 在 IEC 60076 - 11 中的干式变压器。

IEC 60076 系列包括着以下和能效有关的部分:

- 1) 第 1 部分: 1993, 总体—术语定义。
- 2) 第 2 部分: 1993, 温度上升。
- 3) 第 3 部分: 1980, 绝缘等级和绝缘强度测试。
- 4) 第 5 部分: 承受短路电流的能力。

5) 第 7 部分: 2005, 为油浸式电力变压器的负荷指导。这一部分按照 IEC 60076 标准从操作温度和热介质的角度为电力变压器的规格和负荷提供了推荐。它也为铭牌额定值以及为计划制订者选择新设备的额定数值的指导上提供了推荐。使用寿命是基于在绕组中的热点温度的考虑。当热点温度增加 6K 时,使用寿命将减少 50%。

- 6) 第 8 部分: 1997, 应用指导。

最重要的部分是在总损耗中 (包括有负荷和无负荷损耗) 的最大允许公差是总损耗的 +10% (IEC 60076 - 1)。标准 IEC 60076 - 1/7.1 条款规定,变压器的损耗值或效率等级不是变压器铭牌上的强制性信息。

IEC 的第 14 技术委员会的创造性很值得一提,他们启动了一个新 IEC 60076 - XX 标准的项目: 电力变压器—第 XX 部分: 配电变压器的能效。

这一标准旨在指导电力变压器的购买者选择最合适的能效等级,明确提出效率的最适合的方法。它也提供在其他标准中没有的损耗测量的指导,以及某些型号变压器的标准损耗表格。

作为理由，它阐述能源效率作为一个世界性的电力传输和分配的问题变得越来越重要。标准要能够根据变压器的使用方式及变压器种类提供一个计算能效的方法，因为在能源应用和变压器安装中的资源利用间的最佳平衡取决于这些因素。

本标准的目标如下：

1) 依据以下参数计算能源效率：

① 负荷种类（电抗性、电感性、电阻性）；

② 额定功率的级别；

2) 提供有负荷损耗和无负荷损耗的标准等级，来适应特殊的效率要求；

3) 能够进行损耗测量的方式；

4) 可以考虑的测量不确定性的方式；

5) 保证公差。

现在具体看一下不同国家的 MEPS。

对于包括（配电）变压器的 MEPS 的关注效率支持的法律文件的国际活动中有一个重要的等级。这些国际上效率等级的比较不总是很明显，因为：

1) 电力配送系统之间的区别：电网电压、电网频率（50Hz/60Hz）等；

2) 变压器的额定视在功率的区别（输入电能/输出电能）；

3) 变压器能效测量时的负荷等级的区别（50%、100% 负荷等）；

4) 规范工作温度间的区别；

5) 变压器之间的不同额定尺寸。

在准备 MEPS 的过程中需要考虑社会、经济和技术可实现性等方面。通常的方式是设定与最小化的产品寿命周期尽可能相近的标准。环境的角度同样重要，但是寿命周期成本和寿命周期评估是不同的，它们对大多数的变压器都有着相似的结果。原因是变压器的使用阶段，尤其是配电变压器，通常要负责超过 95% 的寿命周期影响。这些带有排放的变压器损耗的能量在那里是占主要的。与能量排放最相关的全球变暖和酸化的潜在可能性对环境有相应的影响。总的来说，这会有很多的环境影响，包括着 GWP 和酸化以及富营养化、臭氧耗竭等。其中，GWP 和酸化的影响比其余的总的影响还要大 100 倍。图 3.2 给出了欧洲 MEPS 预研时所分析的配电变压器的能源成本（包括产品应用的能源和寿命阶段的结束）和寿命周期的对比。

图 3.2 中的 * 号表示非晶态金属铁心的选项，在早期，MEPS 没有把它作为技术考虑。在这一点上值得深入研究寿命周期成本的结构。

这主要有 3 个部分：变压器价格、有负荷成本和无负荷成本。这里我们更多地关注于变压器的价格以及它与损耗的关系。图 3.3 比较了产品价格和配电变压器损耗的资本成本。理想来说，变压器增加的价格完全可以由减少的损耗成本来弥补。

在 A_0C_k 损耗级别，这种情况具有最低的生命周期成本（LLC），并且这是为 630kVA 以下的变压器提出的 MEPS。然而，正如由于较高的负荷和较低的相对产

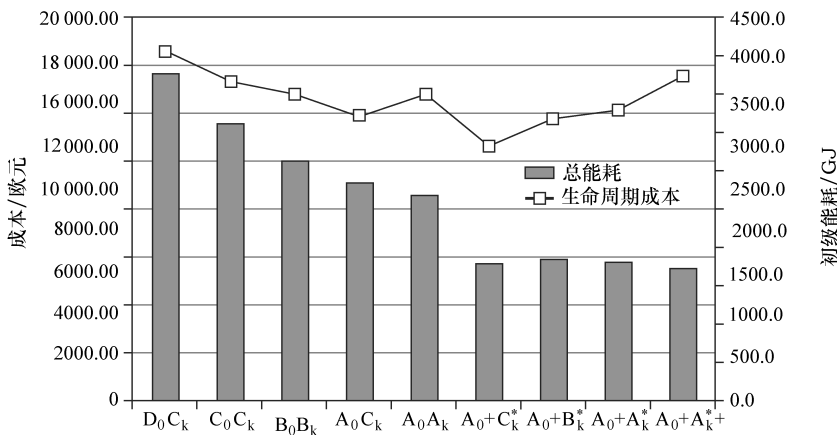


图 3.2 400kVA 油浸变压器的环境性能、生命周期成本与基本能耗之间的关系

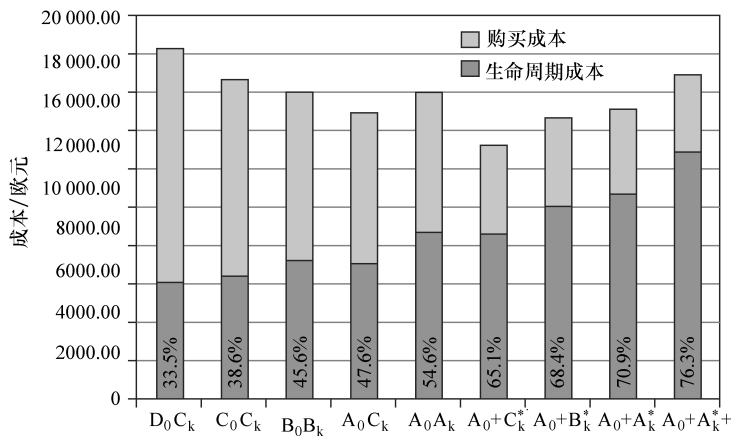


图 3.3 400kVA 油浸变压器环境性能、价格与损耗费用之间的关系

品成本，在 A_0A_k 和 A_0C_k 之间 LLC 的区别随着变压器尺寸的增加而减少，像 MEPS 一样， A_0A_k 的损耗混合是为 630kVA 以上的变压器而提出的。同时，即使在给出的例子中， A_0A_k 与 A_0C_k 相比，损耗提供了超过 100GJ 的主要能量的激励，而且这一值将会以超过和变压器额定功率成比例的形式增长（转换因子 $1\text{kWhe} = 10.5\text{MJ}$ ，这是欧洲预研时的方法，用来转换电力损耗）。

对所有显示出变压器的成本区别的变量的精确分析见表 3.6。

很明显，损耗的减少和相关成本来自于某些费用。美国能源部估计能源效率每提高 1% 会使变压器的价格提高 73%（DOE，2001）。最近的 EuP 研究表明，一个 400kVA 油浸变压器，根据已售配电变压器进行平均得到的最具代表性大小的变压

表 3.6 环境性能、不同选择的比较、产量和损耗

		D ₀ C _k	C ₀ C _k		B ₀ B _k		A ₀ C _k		A ₀ A _k		A ₀ + C _k [*]	
			相对值	绝对值	相对值	绝对值	相对值	绝对值	相对值	绝对值	相对值	绝对值
心	钢心/kg	468.7	1.12	524.94	1.22	571.81	1.35	632.75	1.45	679.62	1.59	747
绕组	铝线/kg	21.44	1.06	22.73	1.44	30.87	1.37	29.37	2.07	44.38	1.59	82
	铜线/kg	144.72	1.06	153.4	1.44	208.4	1.37	198.27	2.07	299.57	1.59	206
	铜片/kg	48.24	1.06	51.13	1.44	69.47	1.37	66.09	2.07	99.86	1.59	76.88
其他	油罐/kg	266.7	1.1	293.68	1.29	343.78	1.36	361.71	1.64	438.61	1.63	434.79
	纸/kg	16	1.1	17.61	1.29	20.62	1.36	21.7	1.64	26.31	1.63	26.08
	陶瓷/kg	6.02	1.1	6.63	1.29	7.76	1.36	8.16	1.64	9.9	1.63	9.81
	油/kg	265.5	1.1	292.36	1.29	342.24	1.36	360.09	1.64	436.64	1.63	432.84
	纸板/kg	3.65	1.1	4.02	1.29	4.71	1.36	4.96	1.64	6.01	1.63	5.96
	塑料/kg	2.05	1.1	2.25	1.29	2.64	1.36	2.78	1.64	3.37	1.63	3.34
	木头/kg	4.38	1.1	4.83	1.29	5.65	1.36	5.95	1.64	7.21	1.63	7.15
	粉末涂料/kg	5.79	1.1	6.37	1.29	7.46	1.36	7.85	1.64	9.52	1.63	9.43
	总计/kg	1253		1380		1615		1699		2060		2041
	最终产品的体积/m ³	2.11	1.1	2.32	1.29	2.72	1.36	2.86	1.64	3.47	1.63	3.44
	P ₀ /W	750		610		520		430		430		196
	P _k /W	4600		4600		3850		4600		3250		4554
	50% 负荷时的效率 (%)	99.05	1.073	99.12	1.221	99.26	1.168	99.21	1.347	99.38	1.294	99.33
	电量损失 (kWh/年)	7858		6632		5633		5055		4677		2992
	产品价格 (欧元/个)	6122	1.05	6428	1.19	7285	1.16	7101	1.42	8693	1.41	8632
	50% 负荷时上涨的价格 与总损失的比值				98%		97%		97%		105%	

器，经历着一个损耗减少的比例和增加的价格相近的情形，但是在更高效率层面上的损耗会如预期一样有更高的价格增加，参考表 3.6 的最后一行。

MEPS 以在某一负荷级下（100% 或 50%，这代表越接近实际工况下的负荷，也越接近最优效率的负荷）计算的最大损耗表或效率表的形式编排。日本的领先方案用公式去计算在 40% 负荷下不同 kVA 值的变压器的效率。印度人实施了一个有趣的想法，对于两个变压器负荷级 50% 和 100% 明确规定了最大损耗。这是为确保变压器达到要求的有负荷和无负荷损耗的比例。

除了损耗，欧洲标准规定了噪声等级和无负荷损耗，因为变压器中的噪声和变压器铁心中的磁化最相关。

3.4.1 MEPS

主要的国际 MEPS 被列在了表 3.7 中。

表 3.7 国际 MEPS

国家	标题
澳大利亚	AS 2374.1.2—2003：电力变压器—最低能源性能标准（MEPS）要求配电变压器（10—2004）
加拿大	变压器要符合强制性的 MEPS（01-01—2005）
欧盟成员国	针对以能源相关产品指令为框架的筹备工作的配电和电力变压器的能源性能标准
印度	针对容量为 16kVA、25kVA、63kVA、100kVA、125kVA 和 200kVA 的配电变压器的 MEPS（2010）
以色列	针对配电变压器的 MEPS—以色列
新西兰	AS 2374.1.2—电力变压器第 1.2 部分：MEPS 要求配电变压器（01-10—2004）
中国	GB 20052—2006 三相配电变压器能源效率和节能评价最低允许值（2006）
美国	针对配电变压器的 MEPS（2010）

3.4.2 强制性标识

主要的国际效率标识项目已经被列于表 3.8 中。

表 3.8 国际效率标识

印度	星级计划—配电变压器（2010）
以色列	配电变压器的能源标签—以色列
日本	零售商的标签显示程序—“领跑者计划”—变压器
中国	中国能源标签—电力变压器（2010）

3.4.3 非强制性项目

主要的国际非强制性方案被列于表 3.9 中。

表 3.9 国际非强制性方案

中国	CQC 标志认证—电力变压器（2010）
韩国	高能效电器方案变压器认证（一）
美国	能源之星—变压器（1995）

考虑到在之前提到过的缺少的完全一致，对所选择的国际间的 MEPS 的比较列于表 3.10 中。

表 3.10 国家 MEPS 比较

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
等级	美国	美国	美国	美国	澳大利亚	澳大利亚	澳大利亚	中国	欧盟	欧盟干式	印度	欧盟 25	欧盟 25
KVA	油浸式	干式	油浸式	干式 MV	油浸式	干式	油浸式 高效	S11	油浸式 建议	建议		海湾	市场
15 或 16	98.36%	97.00%	99.31%	98.75%								97.12%	97.80%
25					98.28%	97.17%	98.50%				98.36%	97.58%	98.24%
30	98.62%	97.50%	99.42%	98.95%								97.56%	98.36%
45	98.76%	97.70%	99.47%	99.05%								97.84%	98.44%
50								98.67%	98.54%			98.15%	98.44%
63 或 75	98.91%	98.00%	99.54%	99.17%	98.62%	97.78%	98.82%				98.82%	98.27%	98.66%
100					98.76%	98.07%	99.00%	98.86%	98.84%	98.58%	98.98%	98.52%	98.76%
112.5	99.01%	98.20%	99.58%	99.25%									
150	99.08%	98.30%	99.61%	99.30%									
160								98.96%	99.00%	98.75%	99.05%	98.67%	98.86%
200					98.94%	98.46%	99.11%				99.12%		
225	99.17%	98.50%	99.65%	99.37%									
250								99.08%	99.11%	98.92%	99.15%	98.88%	99.01%
300 或 315	99.23%	98.60%	99.67%	99.41%	99.04%	98.67%	99.19%		99.15%				
400								99.17%	99.21%	99.09%	99.18%	99.00%	99.15%
500	99.25%	98.70%	99.71%	99.48%	99.13%	98.84%	99.26%		99.25%		99.26%		
630								99.24%	99.29%	99.12%		99.13%	99.28%
750	99.32%	98.80%	99.66%	99.42%	99.21%	98.96%	99.32%		99.46%			99.22%	99.31%
1000	99.36%	98.90%	99.68%	99.46%	99.27%	99.03%	99.37%	99.25%	99.47%	99.29%		99.16%	99.29%
1500	99.42%		99.71%	99.51%	99.35%	99.12%	99.44%						
1600								99.34%	99.48%	99.37%		99.33%	99.39%
2000	99.46%		99.73%	99.54%	99.39%	99.16%	99.49%			99.39%			
2500			99.74%	99.57%	99.40%	99.19%	99.50%		99.49%	99.42%		99.35%	99.37%

所有展示出来的效率应用于三相变压器。

表 3.10 中的损耗不可直接比较。一个特殊的区别就是在 50Hz 和 60Hz 系统中对比效率。在其他参数都一样的条件下，60Hz 下的变压器将会有更高的无负荷损耗和更低的有负荷损耗。如果一个变压器的最优效率接近 40%，产生的差异在 50% 负荷下大约为 10%。事实上在澳大利亚第一次尝试中，它们“转化”美国的 60Hz NEMATP1 效率标准到澳大利亚的 50Hz 频率，并且在澳大利亚不同于美国的尺寸等级下线性插入了效率值。实际上，一种检查应用美国标准，效率等级在 99% 以下扣除 0.2%，为得到标准的粗略等效，对于 99% 以上的等级要扣除 0.1%。如果这么做，我们可以发现美国规则是目前世界上最高要求的规格。在欧洲，等级也有很高的要求，尤其对于 630kVA 以上的变压器，应牢记它们是具有磁化铁心的变压器。目前，在欧洲，非晶态金属变压器还不是主流产品，短期内非晶态材料的可利用性还有不确定性；而在欧盟，变压器产品提出的等级比较模糊，但应用非晶态技术可以获得。

超过 95% 的非晶合金变压器在亚洲和美国出售，其中主要在印度、中国、日本，美国的需求也在上升。不久前，2006 年，西班牙的 Endesa 这样一个做了许多非晶合金变压器采购的公司报告，大约 22000t 的非晶钢被使用。Hitachi Metals/Metglas 在 2009 年指出非晶铁的产量在 2008 年是 50000t，并有望在 2010 年时达到 100000t（然而，这些产品并不能都被指望进入变压器市场）。如果我们把 400kVA 当做是安装变压器的平均功率，在 600kg 的铁心材料中，每年大约生产 37000 个非晶合金变压器（基于 2006 年数据），这约是每年全世界总销售量的 1.2%。

列 4 和 5 规定了最好的可获得的技术（BAT）的效率等级，如果可以使得成本不是问题，这种技术是有可能达到的。它们被增加到最后的规格中，用以阐述 BAT 和 MEPS 之间的区别。列 8 是澳大利亚的 MEPS，这不是为了普通的变压器，而是为了高效率的电力变压器。最后，列 13 和 14 用于比较当前欧洲实施的标准。列 13 给出了在欧洲运行的普通变压器的等效效率，而列 14 明确说明在 2005 年在欧洲卖出的变压器的平均效率。

关于 60Hz 频率转化为 50Hz，在 MEPS 下的重新划算已经展示在图 3.4 中了。

一个激进的（最雄心勃勃的）是美国能效标准，这里被称为 BAT，而在原始表达中是“如果成本不是问题”。其

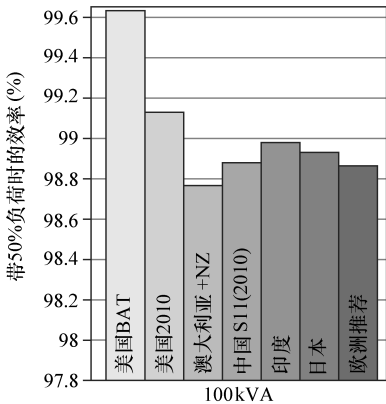


图 3.4 各特定 MESP 下 50Hz、100kVA 电力变压器的效率比较

他的规模就差得很远，比如南非标准 SANS 780—2004 规定，在 50% 负荷下的损耗与 96.45% 的效率是等效的。

3.5 生命周期成本

变压器的年能量损耗估算公式如下：

$$W_{\text{loss}} = (P_0 + P_K L^2) \times 8760h \quad (3.8)$$

式中 W_{loss} ——年能量损耗 (kWh)；

P_0 ——无负荷损耗 (kW)——变压器说明书中可获得的参数或可以被测出的参数；

P_K ——短路损耗 (或负荷损耗) (kW)——变压器说明书中可获得的参数或可以被测出的参数；

L ——变压器的平均每单位负荷 (对恒定负荷来说是完全精确的，对变量多的负荷来说就没那么精确了)；

8760——全年小时数。

为计算这些损耗的成本，需要把它们放到相同的视角中，并且它们要被转换成采购时分配的资金值作为采购价格，这称为损耗的总资产价值，即 TCC_{loss} ，可以用下式计算：

$$TCC_{\text{loss}} = W_{\text{loss}} \frac{(1+i)^n - 1}{i (1+i)^n} C \times 8760 \quad (3.9)$$

式中 C ——估计的每年每 kWh 的平均成本；

i ——估计利率；

n ——变压器的预期生命。

3.5.1 变压器的生命周期成本

为了进行变压器的经济分析，对于变压器整个生命过程有必要计算生命周期成本，有时被称为“所有的总成本”，或者换句话说，变压器的投资成本。所有这些术语意思都相同——在一个公式里，采购、运行和维护变压器的成本，需要考虑资金的时间价值。

“资金的时间价值”的概念是今天收到的金钱比将来收到的金钱有着更高的价值，因为今天收到的金钱是很有利用价值的。

在实际中，可以简化一些。每个变压器都有自己的采购价格和损耗参数，其他成本，诸如安装、维护及停运等对于相似的技术来说是差不多的，并且可以从计算中去除。只有当比较不同的技术时，像配备油冷变压器的空冷干式变压器就需要考虑这些因素。

只考虑采购价格和损耗成本时，“所有的总成本”计算公式为

$$TCO = PP + AP_0 + BP_K \quad (3.10)$$

式中 PP——变压器的购买成本；

A ——每瓦无负荷损耗的分配成本；

P_0 ——额定无负荷损耗；

B ——每瓦有负荷损耗的分配成本；

P_k ——额定有负荷损耗。

P_0 和 P_k 是变压器的额定损耗， A 和 B 的值取决于预期的变压器的负荷和能源价值。

参数 A 和 B 的选择是很难的，因为它们取决于通常不可知的变压器的负荷和变化着的能源价格和利率及预期的经济生命周期。如果负荷随时间的变化而增长，增长率必须为已知的或可估算的，并且可获得的能源价格必须为可以预知的。通常， A 的值从少于 1 欧元/W 到 8 欧元/W， B 的值在 0.2 ~ 5 欧元/W 之间。

下面我们为配电变压器提出一个相对简单的方法来决定 A 和 B 的参数。

A 和 B 的参数可以计算如下：

无负荷损耗成本：

$$A = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \times C_{\text{kWh}} \times 8760 \quad (3.11)$$

有负荷损耗成本：

$$B = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \times C_{\text{kWh}} \times 8760 \times \left(\frac{I_1}{I_r}\right)^2 \quad (3.12)$$

式中 i ——利率（%/年）；

n ——使用寿命/年；

C_{kWh} ——kWh 价格（欧元/kWh）；

8760——年小时数（h/年）；

I_1 ——负荷电流（A）；

I_r ——额定电流（A）。

这些公式假设在变压器的生命周期里能源价格和负荷为常数，我们之后再进行讨论。

通常，损耗评估从报价单的要求上计算 A 和 B ，并且提交给变压器生产商，之后供应商将会按照性能要求开始变压器的设计环节。这个公开的过程的结果应该是最便宜的变压器，例如有最低所有的总成本的变压器，为给定的应用进行优化。这一过程的缺点就如所提到的那样，很难有信心预测未来的负荷趋势和电能损耗以及关税。另一方面，这些优化的成果取决于材料价格，尤其是活动的材料，也就是导体和铁心材料。当诸如铝、铜或高或低损耗的磁铁钢等不同的材料价格有价格上的差异时，动态优化非常有必要。

对于几兆伏安以上的大变压器，损耗的成本非常高以至于变压器是定制的，应调整使得适应于用来满足某个项目的特殊要求的损耗评估数据。

对于通常大批量采购的配电变压器，这个过程几年进行一次。这就需要最优的变压器设计（少部分是由于当今金属价格的反复无常），这可以使得其在能源价格和负荷剧烈变化前使用数年。

为了使得这一资本化过程更加吸引人，TCO 的使用就更容易一些，我们提出一个用以确定参数 A 的图，如图 3.5 所示。

参数 A 表明在无负荷损耗成本和以下因素之间的关系：

- 1) 电价；
- 2) 折扣率或公司利率或平均资金成本；
- 3) 资本化周期或变压器的预期寿命。

这个例子阐述了对于电价为 100 欧元/kWh、利率为 5% 以及 10 年资本化周期来说，无负荷损耗的成本是 6.75 欧元/W。

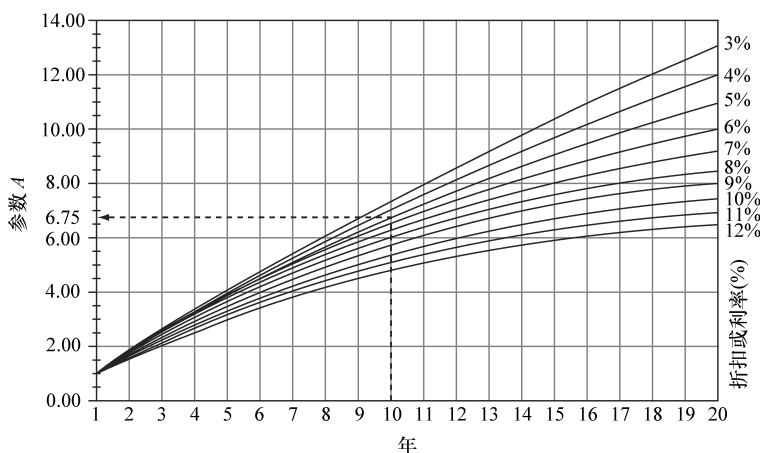


图 3.5 电价为 100 欧元/MWh 时参数 A 的简图

由于参数 A 与电价是成正比例的，所以只要利率和资本化周期保持不变，就可以按照比例很容易地计算出电价的变化所对应的参数 A 。

很重要的一点是，对于低利率来说，资本化周期的加倍将会导致损耗成本几乎翻番。另一方面，把资本充足率提到很高，例如防范风险的准备金很高，那么就会产生较低的损耗值。

前面已经阐述过，参数 B 是参数 A 和负荷参数二次方的乘积 ($B = A \times \text{负荷参数}^2$)。这里使用的负荷参数是预期的变压器使用寿命期间的平均负荷，可能的话要考虑谐波。

对于较大型电力变压器，总成本公式更加复杂。首先，一些其他的组分需要被加到基本公式中，以反映出风扇或水泵等类似于负荷损耗的辅助损耗的资本化损耗。接下来要详细讨论的组分是尖峰负荷能力，这将用于补偿不会发生在系统尖峰

损耗的变压器的尖峰负荷损耗。这意味着只有尖峰变压器损耗的一部分将会对系统的尖峰需求产生贡献。这个关系是两个变压器负荷的比率：

- 1) β_{syst} ：变压器在系统峰值时的负荷；
- 2) β_s ：变压器峰值负荷。

最后，对于能源成本的基本公式现在包括额外的组分 C_{inv} ，以反映对于通过变压器传输的 1kWh 的能源有关的发电和输电设施成本的系统投资，因为一个安装于发电厂的变压器不需要在传输设备上投资，这在过去常常用于评价在发电站变压器损耗的价值应该比坐落于某一个城市中的传输网络中的变压器便宜。

决定这个值的方法涉及增加一个最近建成的或者即将建成的发电站的建筑成本到所需要的连接变压器到工厂的传输设备的成本。如果能源不是自己生产的而是购买的，这个值可以通过用所需开支除以固定开支率得出。可以有不同的方法来估计这个被称为发电和传输能力的规避成本的花销。所选的方法应该得到最现实的结果。

总之，包括了尖峰负荷能力和 T&D 能力的简化公式如下：

$$C = C_{\text{kWh}} + C_{\text{inv}} \times \left(\frac{\beta_{\text{syst}}}{\beta_s} \right)^2 \quad (3.13)$$

损耗成本取决于电压等级和较少的额定功率、位置或变压器型号。一些例子或者变压器中的损耗价值的指示值如下。

对于配电变压器，损耗成本为 3 ~ 10 美元/W，有时在非常高的电价、低利率及很长的使用寿命的情况下甚至更高。

对于电力变压器来说，由于尺寸、无负荷损耗和千瓦而不是和瓦相关，并且通常为 2000 ~ 7000 美元/kW，平均大约为 5000 美元/kW。发电之间也有一些区别：变化的燃油价格和传输系统的操作成本。

至于有负荷损耗，规定的值是无负荷损耗的一个部分，严格地取决于假设的负荷。对于配电变压器，这一部分通常是无负荷（大约为 40% 的负荷）损耗成本的 15% ~ 20%，但是在输电变压器中，它们甚至更高，通常为无负荷（55% ~ 70% 的负荷）损耗成本的 30% ~ 50%。

3.5.2 细节问题

变压器负荷在使用寿命成本中起着特别重要的作用。负荷损耗随着负荷的二次方变化。

理想状态下，为了计算负荷损耗，有必要整合所有实际负荷与额定负荷的瞬时比例的二次方。这实际上是不可能的，所以提出了一个基于变压器消耗能量总和来分析负荷损耗的方法。

下式是用于计算负荷损耗的公式：

$$\sum P_k = \beta_s^2 \tau P_k \quad (3.14)$$

式中 $\sum P_k$ ——在给定时间段（通常是1年）的负荷损耗的总和；

β_s ——在给定时间段内变压器的峰值负荷；

τ ——损耗峰值时间；

P_k ——变压器的额定损耗。

注意， $(I_1/I_r)^2$ 来源于参数 B 的计算公式，可以用 $\beta_s \tau$ 的形式表达。尖峰损耗的持续时间 τ 和峰值负荷持续时间 T_s 的关系如图 3.6 所示。

T_s 是峰值负荷条件下转化能量等同于实际能量转化的每年的时间分数； τ_s 是峰值损耗（峰值负荷时）等同于实际损耗的每年的时间分数。

人们已经开发出不同的经验模型来定义如下的关系：

$$\tau_s = f(T_s)$$

有些例子如下式：

$$\frac{\tau_s}{8760} = \left(\frac{T_s}{8760} \right)^x \tag{3.15}$$

x 在 1.7 ~ 1.8 之间变化，或者

$$\tau_s = A \left(\frac{T_s}{8760} \right) + B \left(\frac{T_s}{8760} \right)^2 \tag{3.16}$$

A 在 0.15 ~ 0.5 之间， B 在 0.5 ~ 0.85 之间，此外 $A + B = 1$ （最后的条件也有例外）。对于这些公式的物理解释非常难，并且一直未被证实。

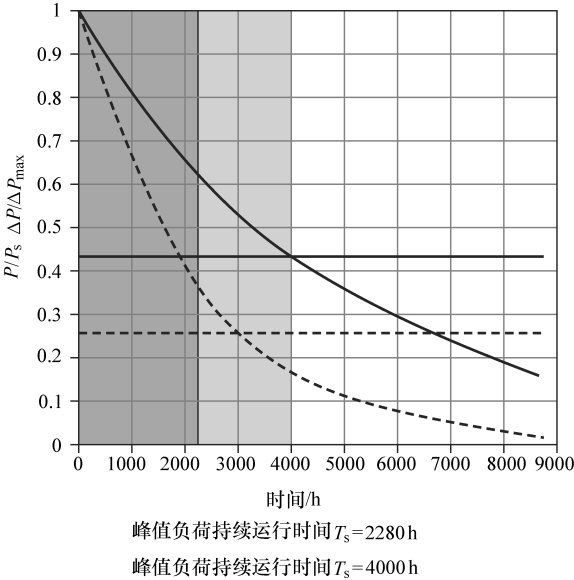


图 3.6 前半年负荷为全年平均负荷两倍、后半年负荷为零情况下峰值损耗持续运行时间与峰值负荷持续运行时间的关系分析

在 SEEDT 中，它们从精确点的角度比较分析了这些公式。 x 值为 1.73 时可以达到最好的结果，或者 A 的值是 0.3，而 B 的值是 0.7。

在配电公司中配电变压器的平均负荷在 EU-27 中为 18.9%，峰值负荷是 0.53（53%）。峰值负荷的时间是 0.36，尖峰损耗的时间是 0.2。在配电公司中的变压器有这么低的负荷是有很多原因的，例如预期的负荷变化范围很大以及需要储备容量在当输电网络中其他节点或部门发生故障时来提供快速恢复的能力。另一个原因是在恶劣的技术条件下（例如潮湿绝缘及进一步恶化导致故障的风险）变压器上的负荷受到限制。更深层次的原因是要保护配电变压器防止短路，但是不能防止过载或温度过高以及大幅度应用。这些都是平均值，不同的国家情况会有较大的差别。

工业上的变压器比配电公司所有的变压器的负荷要大很多，平均值是 37.7%，尖峰峰值负荷是 0.7，峰值负荷的时间是 0.15，峰值损耗的时间是 0.3。这意味着负荷（可以有峰值，也可以有最低值）是间断的。

很明显， τ 值在 T 值的 50% ~ 60% 之间。理论上，当图 3.6 中 T 曲线是一条在峰值负荷和零负荷之间的直线（负荷连续且均匀分布在峰值和零之间）的情况下， τ 是 T 值的 50%。另一方面，当 T 曲线是一条水平直线（全年负荷相同）时， T 值和 τ 值相等。

有必要理解负荷情况对于计算参数 B 的影响。在实际情况下，我们还需要做些额外的努力去预测负荷随时间的变化。

在设计有着很强的加载依赖的变压器中，给予有负荷和无负荷损耗的相对权重可以决定这个变压器是否在铁心中有着更多的导体材料或者更少的铁心材料，反之亦然。设计的选择也会对变压器的运行产生影响，尤其是它的损耗。例如，在 24% 负荷还是 47% 负荷下能够得到最优效率取决于变压器的设计（见图 3.1）。当在恒定的电流密度下比较时，有更多导体材料的变压器会有更大的负荷损耗，这就是我们通常所说的“铜损”。严格来讲，对于这些损耗，一个更加精确的俗名是“铝损”，因为在铝导体中，损耗比相同横截面积的铜导体的损耗大 35%。但是“铜损”这一术语不太可能改变，因为它反映了铜在历史上是变压器中所使用的标准导体材料的事实。

如果磁通密度、频率和铁质量都是常数，变压器中的无负荷损耗（通常称为铜损或者是铁损）取决于铁心中所应用的铁的量。相似的是，如果电流密度是常数，那么通俗地说，铜损取决于所用的铜的量。另一方面，铁损可以通过增加铁心上的匝数来减少，并且磁通密度（感应）也相应减少。相比之下，铜损可以通过在更高的磁通密度下的工作和在铁心上用更少的线圈来减少，但是这只能在严格的限制下实现，因为高质量的磁性材料有着很尖锐的磁性饱和点，并且最普通设计的变压器工作点与这个极限很接近。减少铜损的主要意义是降低电流密度，而保持线圈匝数和铁心横截面积不变，以及通过增大绕组间隙进而可以使用较粗导线的方法

来改善铁心。

如果一个变压器在大部分的生命周期里工作于无负荷或者是最小负荷情况下,那么应该应用最小负荷的设计,也就是说,少一些铁,多一些铜。然而,如果从中推断出永久满负荷运行(只会发生在发电厂的发电变压器或某些工业应用中)的变压器设计时应该有尽可能少的铜的结论是错误的。在这种情况下,所选择的方法就是为了最小化匝数而最大化铁心的横截面积。在连续满负荷运行的变压器中,导线的横截面积应该尽可能大。

到目前为止,在生命周期成本中我们还没有包括来自于谐波、不平衡及无功功率等原因造成的额外损耗的影响。对于谐波和不平衡,没有简单的方法,3.1节已经给出一些指导。总体上讲,平均而言,来自谐波的额外损耗是在名义损耗百分之几的等级,然而,在一些工业的应用和办公楼中,当电能为畸变负荷供电时,这些损耗甚至可以达到名义损耗的两倍。至于无功功率的影响,这就更难做出准确的计算。有一些指标显示,在供电网络上的变压器无功功率等效的有功功率损耗可以在0.15kW/kvar等级。

目前,我们也没有考虑由于新用户和新负荷的连接导致的变压器功率的增加以及能量的流动。这有时也是非常重要的,因为每年的增加可能导致非常高的额外损耗以及变压器在离最佳(负荷)工作点越来越远的点运行。当负荷增加到很大时,应该分析基于变压器年度预期负荷计算出来的年度损耗的总额。

最后,同样重要的是能量成本因素。甚至还有一些在无负荷损耗和有负荷损耗的能源成本进行区分的想法。在有负荷损耗时,更高的发电成本和增加着的能源分配成本及焦耳损耗与负荷的关系二次方程相结合,将会导致能源负荷损耗的增倍或者是比能源名义成本更高。

3.6 设计、材料和制造

由于用数学工具及模型进行改进的数据处理,现在可以应用带电力和机械强度、热传导以及包括短路条件的动态特性等有限元方法设计变压器。作为一个实际的结果,可以画出二维或三维的试验图,以帮助设计不同的变压器参数,并使得损耗在一个期望的等级,可以在成本和效率之间得到最好的平衡。在实际中,要最小化一个不成比例的花销成分(如为了在设计环节上损耗最优的导体、绝缘体或铁材料)的增长的影响。

材料和材料处理技术的发展在损耗上有着最大的影响。没有材料技术的进步,变压器效率就不可能这么大规模地改进。在本节,我们只探讨对减少损耗有影响的改进。

制造技术也包括一些改进,较好的堆叠、制造的精度、绝缘和杂散磁通的防护等,加入这些虽然对损耗减少影响较小,但还是非常有意义的。

3.6.1 铁心

在铁心和绕组中使用的材料都对电力变压器的成本有着显著的影响，因为在任何情况下电力变压器的制造都是高度劳动密集型的过程。

在铁心材料的发展中，主要的里程碑有：

- 1) 冷轧晶粒取向的电工钢的发展；
- 2) 有很好的力学性能的薄涂层的引入；
- 3) 钢铁改进的化学作用，如 HiB 磁钢；
- 4) 晶粒方向的进一步改进；
- 5) 激光画线和等离子辐照钢的引入；
- 6) 用以减少铁心损耗中的涡流损耗成分而连续减少层叠贴片厚度；
- 7) 引入用于配电变压器和小型变压器的非晶薄带（没有结晶的结构），它是应用快速冷却技术制造的。

这些提升已按照时间顺序列于表 3.11 中。

表 3.11 铁心钢板发展历史

年份/年	材料	厚度/mm	损失（50Hz）（W/kg）	磁通密度/T
1895	铁线		6.00	1.0
1910	热轧硅铁片	0.35	2.00	1.5
1950	冷轧，晶粒取向	0.35	1.00	1.5
1960	冷轧，晶粒取向	0.30	0.90	1.5
1965	冷轧，晶粒取向	0.27	0.84	1.5
1970	冷轧 HiB 薄片	0.30	0.80	1.5
1975 之后	无定形铁	0.03	0.20	1.3
2005 之前	无定形铁被改善的 HB1	0.02	0.15	1.3（1+10%）
1980	冷轧，晶粒取向	0.23	0.75	1.5
1980	冷轧 HiB 薄片	0.23	0.70	1.5
1983	激光处理 HiB 薄片	0.23	0.60	1.5
1985	冷轧，晶粒取向	0.18	0.67	1.5
1987	等离子体处理 HiB 薄片	0.23	0.60	1.5
1991	化学蚀刻 HiB 薄片	0.23	0.60	1.5

3.6.1.1 冷轧晶粒取向和 HiB 磁钢

为层叠铁片正确选择薄板钢，利用频繁摇摆（每两层）准确地堆叠以及残留空气间隙的最小化，都是减少开路电流和无负荷损耗的关键参数。现在，实际上尽管冷轧晶粒取向钢（层叠片越薄，涡流越小）的成本明显偏高，所有铁心层叠铁片都是用这种钢做的。

应用逐渐提升的、更好的非晶粒取向的铁片、切割技术、正在减少的薄片的厚

度都通过以上的一两个应用在过去 30 年使用带来了这些损耗的减少。当在比较 20 世纪中叶时的这些损耗时，这些因素在 3 个以上。

图 3.7 很好地说明了 SEEDT 模式下的这一过程，它展示了在欧洲与变压器相关联的年龄人口和它们无负荷和有负荷损耗的相对应的份额。为了帮助合理地理解这个图，一个结论是取代 10% 最老的（主要基于最低效率模型）的变压器将会减少整个无负荷损耗的 21.5%。相似的，将最老的 20% 的变压器不再应用，将会节约大约总的无负荷损耗的 35% 和总的有负荷损耗的 30%。

如果我们不提大型和超大型的电力变压器领域在效率上的进步是不公平的。尽管非晶态金属还没进入变压器的这一部分（如果没有非晶态铁心上的巨大进步还会依然如此），在过去的 50 年，其他方面的提升已经带来了 60% 的无负荷损耗的减少和大约 50% 的有负荷损耗的减少。同时，听觉噪音已经从 80dB (A) 减少到了 50dB (A)。

铁心制作中的一个重要方面是确保没有涡流循环。正因为如此，即使在功率 1kVA（取决于生产者）以上的小变压器中，紧固螺栓在一侧电绝缘，尽管这些好处在额定功率 100VA 以下的变压器中也很明显。在相对小的变压器中绝缘的紧固螺栓可以有一些优势，但在很大的配电和大电力变压器中，这些好处将会很明显。

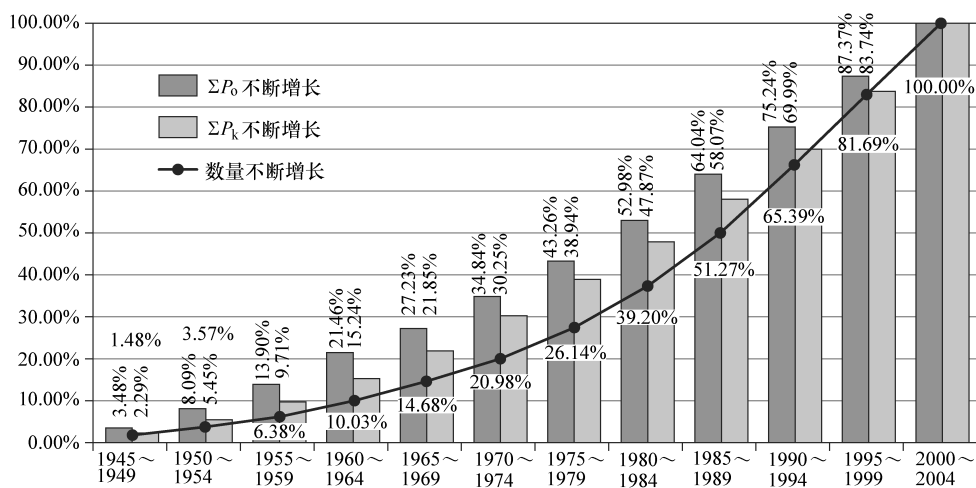


图 3.7 变压器的年龄构成及各年龄段变压器的总损耗

在磁轭中由型钢建造而不是木制的更大的变压器中，洞孔必须足够大，这样一个隔离刷就可以被推过螺栓的轴去确保螺栓不会和模糊的轭的边缘接触，并且只会和磁轭的一边接触。如果有过多接触点，必须把轭的相关部分都要短接（它将基本上环绕轭的相关部分）。此外，切割螺栓孔将会有效地减少铁心的横截面积。并且涡流也被激发于螺栓中，很明显这不能用层压片制作。有时由不锈钢制作的紧固

螺栓会被选择应为不锈钢，事实上不属于铁磁性材料，尽管它主要是由铁磁性材料的铁和镍组成的。在这些不锈钢螺栓中的磁场强度低一些，从而减少了涡流损耗。此外，不锈钢在涡流中的表现惊人得好，因为它的导电性只是传统钢材的 1/7。

一个更好的紧固轭铁片的方法是用夹具包裹着轭（见图 3.8）。虽然这个方法比用不锈钢螺栓贵一些，然而确保紧固环不会形成一个会使轭短路的闭合电路也是很重要的。

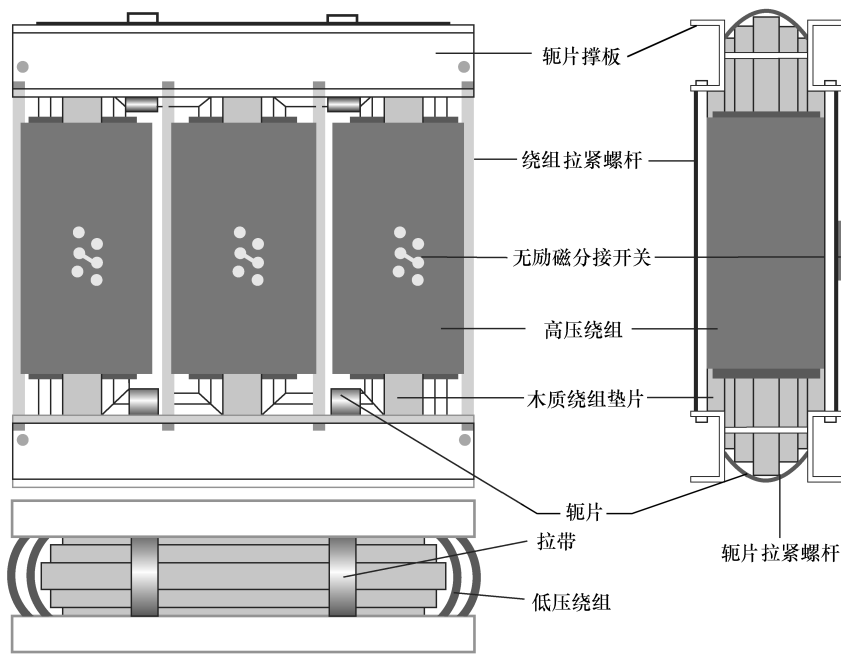


图 3.8 变压器铁心—绕组装配结构图（有源部分）

图 3.8 也显示了在一个高压绕组中变压器的抽头变换器，这将允许任何输入电压的变化（通常是标称电压的 +2.5% 上的两级和 -2.5% 以下两级）。这些在绕组中间的部分并且不会在它的上端或者下端，这确保了高压绕组那个部分的有效轴高度，正如高压和低压绕组相对高度都是常数一样，高压绕组所带电流也必须是常数。如果没有夹紧的话，当短路电流产生轴向上绕组之间的较大的力，那么绕组上端或者下端的许多绕组会大量丢失。没有较紧钳位的话，当短路造成在轴向绕组间上一个重要的力时，许多位于绕组上端或者是下端的线圈将会脱落。在已经使用很久的变压器中，绕组将不会像它们刚被生产出时一样紧固，这是因为绝缘材料随着时间老化。在这样的变压器中的短路或者由于雷击造成的绝缘材料的破坏将会造成设备的完全损坏。在漏电和雷击 10 来年中只发生几次的设备安装地点，变压器在最终由于经济上的原因必须被替换前，可以维持近 60 年较好的运行。

3.6.1.2 非晶钢

美国的联合信号 (America's Allied - Signal) 公司承认花了超过 25 年时间和大量的研发工作使 Metglas® 非晶合金商业生产。Hitachi/Metglas 联合集团是配电变压器非晶态技术的最大促进者。

无负荷损耗可以通过降低磁通密度和用特殊铁心钢的方法降低。铁片越薄, 涡流就越小。涡流在不导电的铁心材料 (铁氧体) 中是完全不存在的, 但是这些涡流将会出现在无线电频率的应用中, 因为它们的可磁化性对于工作在电网频率的变压器而言太低了。非晶钢是一种新型铁心材料, 它能够在完全高度可磁化性和显著减少铁心损耗之间达到折中。尽管作用后的铁心材料有着大约 1.5T 的饱和磁化, 而现代的冷轧晶粒取向钢有着 1.75T, 在非晶钢的变压器中无负荷损耗要少 60%。因为铁心材料的饱和通量密度低一些, 这些变压器将会更大、更重、更贵。有着非晶钢铁心的变压器的噪声也增加了 6dB。

非晶钢通过粉化液体金属, 将它洒在一个它将被快速淬火的旋转的滚筒上, 以让它不能结晶并保持在一个混乱的非晶的状态来制作。这个结构和玻璃非常像, 因此非晶钢通常也被称为金属玻璃 (Metglass, 有执照的生产商)。这个结构和过度冷却的液体也很像, 畴壁可以快速通过随机的原子结构。

当这个“自由”的结构将会随着时间和温度而结晶时, 风险也存在。因此, 晶化将会限制非晶合金的生命周期:

- 1) 当温度是 175℃ 时, 550 年;
- 2) 当温度是 200℃ 时, 25 年;
- 3) 当温度是 350℃ 时, 2h。

所以, 非晶铁心的过度加热可以减少其作为非晶合金的寿命。

非晶钢带只限于配电变压器使用。在过去, 非晶卷铁心通常被认为是最适合于小型单相变压器。由于在 20 ~ 30μm 的厚度范围和制作后的磁场中退火的必要性所导致的诸如硬脆度、机械灵敏度、切割和堆叠等问题将会阻止其在大型变压器中的应用。在低感应下的极好的损耗值的大多数优势将被更高的堆叠系数和损耗快速上升的更低的饱和点所补偿。近些年, 这些缺点已经逐渐被解决了, 非晶带可以更宽并且大于 1MVA 的单元可以被正常地生产。

和传统的变压器钢相比, 非晶金属的性能提供了一个让无负荷损耗减少的巨大机会。这一磁场损耗的经验公式是

$$\text{磁场损耗} = Af + Bd^l f^m B^n / \rho$$

其中, A 和 B 是常数。

非晶金属和硅片的说明和比较在表 3.12 中被给出。

在之前所提及的 Metglas 近年来已经提升了非晶材料, 尤其是非晶金属的减少饱和感应的不足已经被部分地解决了。新的材料在和这些感应相接近 (或者稍高于 1.4T) 处到达饱和, 这些也是传统的磁钢的特点。这使得铁心更紧凑, 并且让

变压器比老式非晶设计更小、更轻。制造者也尝试着去解决诸如硬脆度和在铁心制作中的一些相关的困难。

表 3.12 非晶金属和硅片的磁性能比较

属性/指数	非晶态金属	硅钢
ρ (电阻率)	约 $1.30\mu\Omega\text{m}$	约 $50\mu\Omega\text{cm}$
d (厚度)	约 $20\mu\text{m}$	$200\mu\text{m}$
l	1 ~ 2	2
m	约 1.5	约 2
n	约 2	约 2

3.6.2 绕组

当变压器的铁心服务于磁路时，绕组将会在变压器中形成一个电路，这些电阻损耗将直接取决于一次和二次绕组的电阻。如果绕组的长度和横截面积减少，这些损耗将会降低。绕组的长度和匝数取决于铁心的几何形状和铁心材料的性能。横截面积和损耗是紧密相联的（见表 3.2）。

依据变压器工业中古老的拇指规则，在铁铜应用比为 2:1 附近处生产成本达到最优化。然而，这是一个相当平缓的最优，并且随着铁铜价格的比例而变化。独立于这点的是，应该考虑变压器的工作特性在金属份额变化时也会发生变化，尤其与损耗相关：保持绕组中电流密度和铁心中磁通密度为常数，每千克铜或铁的损耗也大体上为常数。所以依据这一原理，有更多的铁和更少的铜设计出的变压器，将会有更高的铁损耗，而有更多的铜和更少的铁的变压器将会有更高的铜损耗。但是这个并不意味着节省铜和钢可以获得成功。相反的，在保证匝数不变的情况下提高铁心横截面积可以减少铁心损耗，而保持铁心横截面时增加铜的横截面积可以减少铜损。简言之，更大的变压器将会更有效率，金属的价格将会一直是它安装使用的一个障碍。

连续换位导体（见图 3.9）在电源变压器绕组的设计中是一个特殊的新产品。导体设计已经被改进了，通过连续换位导体（一个导体被分成为多个扁平次级导体，并且频繁换位相互绝缘的单导体）的应用，减少趋肤效应和涡流损耗，具有更好的绕组压紧密度。

3.6.2.1 超导材料

在一个由高温超导材料（HTS）做成的超导变压器中，绕组用 77K 的液氮冷却，所以电阻基本可以忽略。在通过氮气处理加入损耗后，负荷损耗可以减少

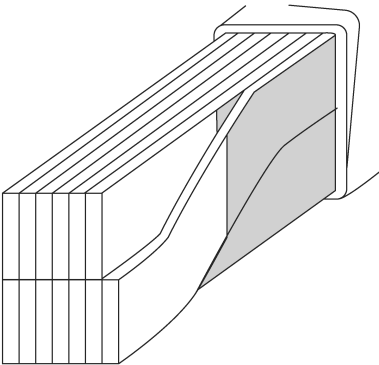


图 3.9 连续换位导体示意图

50%。然而冷却能量不得不被以其最大需求量一直提供，因此增加了无负荷损耗。虽然实际上变压器几乎不会满负荷运行，但是就是因为会有极短时间的满负荷运行，因此冷却能量就要一直按照最大需求量提供。当其满负荷运行时，也只占到一个很短的时间段。当所有这些因素都被考虑到时，总体的损耗减少为最小值。

HTS 变压器大规模的使用在经济上是很可行的，因为冷却系统改进和液氮成本，与电能产品成本非常相关，当电价下降时，损耗减少的利润也会减少。另一个重要的因素是在处理 HTS 导体长度上的进步。

这些除了冷却工厂外的变压器有着更低的重量和容量，并且对超载有着更好的抵抗力，但是是传统变压器价格的 150% ~ 200%。

HTS 变压器在负荷损耗占到总损耗很大一部分比例时是很适合使用的，所以不适合在配电变压器中使用。铁道车辆是超导变压器可以很有效使用的地方。一旦这些变压器进入了工业产品，它们将会节省的不仅仅是重量（因此包括额外能量），还有空间。在铁路车辆上的重量和空间的限制意味着当前使用在铁道车辆的变压器正在工作于它们的设计极限上，并且因此明显的比同类的电网变压器的效率要低。一个机车变压器有着大约 5MVA 的额定功率和大约 10t 的重量，它的效率大约是 95%。一个能量范围相同的静态变压器重达 50t，效率可以达到 99%。在它的使用寿命内，它将产出约 1GWh 的电能节约，因为当额外需求的 1GWh 将被用来运输额外的 40t 的活性材料（铜和磁钢），从而有了 4% 的损耗减少。明显的，这不能算是成功。在这样的应用中，变压器被压缩（通过强制冷却）以减轻重量。

在表 3.13 中超导变压器的最重要的优点和缺点都被列出了。

表 3.13 HTS 的优点与缺点

优点	缺点
1) 无油（液氮 77K）	1) 价格是传统变压器的 150% ~ 200%
2) 质量较轻（10% ~ 30%），不包括冷却装置	2) 额外的维护费用（低温系统）
3) 略微更小的体积	3) 安装场地（额外要求）
4) 超载 25% 不会加速老化	
5) 立即限制短路电流	

3.6.3 其他发展

通过增加变压器的散热率可以提高效率，作为负荷损耗，散热率与温度高度相关。这里的例子就是关于气体绝缘变压器的。一些电源变压器用六氟化硫（SF₆）气体，并且它们有时被以气体绝缘变压器提及。它们的应用对环境问题有着很大的影响，因为 SF₆ 对全球变暖影响很大（一单位 SF₆ = 23600 单位的 CO₂）。

因为 SF₆ 作为绝缘和散热介质的作用有限，这些有着自然或者强制气体冷却的变压器电流密度被设计得很低，因此必须有很高的效率。

这一特殊的变压器在 1987 年被再度发展。气冷变压器实际上已经成为了长期研究的目标。当气体冷却被涉及时，物理学家立刻想到了氢气，因为它有着非常高

的热容量。然而，热容量和氢气的体积有关，氢气的密度几乎是空气的 1/10。另一方面，如果主要的参数是冷循环的冷却环流速度，那么每体积的热容量更加相关，因为流动的阻力和在任何给定的系统的容积流量的二次方成比例。所选择的气体材料因此就是 SF₆。这是一种有名的在配电装置中被用为绝缘材料的物质，并且有着 5 倍于空气的密度，有着很高的绝缘强度。进行电力故障测试的工程师们在一个特殊设计的开顶实验容器实验，可以享受到相当不同寻常的观察，充满空气的气球明显漂浮在实验容器的中部空气。气球当然停在有着更高密度，被缓慢充入容器中的 SF₆ 中。顺便说一下，在这样一个完全无毒惰性气体环境（它的惰性与它的高绝缘强度直接相关）中呼吸会导致有名的氦气“吱吱的叫声”。从事这些实验的工程师们都是活生生的例子，告诉我们这些气体是无害的。然而，用氦气从事的相似的测试应该避免接触到所有人，尤其是吸烟者。尽管，每千克 SF₆ 的热容量是空气的一半，它每升的热容量是 2.5 倍多。这意味着如果 SF₆ 被用作冷却剂，它只需要以在气体冷却的设备的 40% 的循环速度就可以产生相同的冷却效果。因此，风扇电能可以被减少大约 32%，在一个等效的强制空冷系统中是很需要的。两个都有着 2MVA 额定功率的原型变压器，一个波状的箱体和内部强制性冷却（例如，冷却级 GFAN—强制气体，自然的空气）被建造，工作在一个化工厂里有爆炸危险的区域，这个化工厂由气体制造公司拥有。不用说，这个公司当然对这些实验结果也是很有兴趣的。

3.7 案例研究——工业变压器的约束理论评价

大型电力设备通常可以在它们的电力配电变压器的经济分析上给与足够的资源，并且有足够的统计的历史数据完善数据库来评价参数 A 和 B。相反，用户通常没有足够可信的数据来进行相似的分析。

所以这个例子学习的范围不是仅仅分析一个单一的例子，而是一系列的工业用户，它们有着不同特点和消费量来提供统计结果以供客户最终自我认证。

这个研究关注于现有损耗价值的评价和工业消费者使用的 MV/LV 油浸配电变压器的约束理论评价。

7 个标准的工业消费者从 9 个在 EUROSTAT^[1] 数据库中的数据中选出。只有用 MV 提供的才被考虑，这些消费者的电能的年度消费值、平均需求和年度使用情况等特征见表 3.14。

表 3.14 面向计算的标准工业消费

标记	年消耗/kWh	平均需求/kW	年利用/h
Ic	160000	100	1600
Id	1250000	500	2500
Ie	2000000	500	4000

(续)

标记	年消耗/kWh	平均需求/kW	年利用/h
If	10000000	2500	4000
Ig	24000000	4000	6000
Ih	50000000	10000	5000
Ii	70000000	10000	7000

根据表 3.15，每个标准消费者所拥有的变压器的额定功率和数量都已经被假定。

表 3.15 每个标准消费的额定功率和变压器数量

标准消费者	平均要求/kW	平均需求的 功率因数	变压器数目	额定功率 /kVA
Ic	100	0.90	1	160
Id	500	0.90	1	630
Ie	500	0.90	1	630
If	2500	0.90	3	1000
Ig	4000	0.90	2	2500
Ih	10000	0.90	5	2500
Ii	10000	0.90	5	2500

3.7.1 方法

假设变压器属于 EN 50464 – 1 EoDK 表，参考变压器对于每个标准的消费者的约束理论评价已经被计算出。在考虑以下的特征后，类似的变压器的约束理论评价被计算出来。

- 1) 通过处理市场需求，增大变压器以获得最大效率；
- 2) B_k – D₀型变压器；
- 3) 以上方法的结合；
- 4) B_k – C₀型变压器；
- 5) A_k – B₀型变压器。

EN 50464 – 1 EoDK 变压器的例子被假设为不同方法间比较的参考例子。这个方法包括着分析以下结果：

- 1) 所有方法的 TOC；
- 2) 采购成本增加和损耗节约现有价值之间的平衡；
- 3) 在损耗的现有价值和基于基线的不同的方法的约束理论评价。

基于 EN 50464 – 1 EoDK 的方程，拥有总价值被计算出。无负荷损耗（参数 A，单位为欧元/kW 年）每额定瓦特的成本和有负荷损耗（参数 B，单位为欧元/kW 年）每额定瓦特的成本由下式计算出：

$$A = (12C_d + 8760C_e) F_c \tag{3.17}$$

$$B = (C_e h) \left(\frac{S_L}{S_r} \right)^2 F_c \tag{3.18}$$

$$F_c = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \tag{3.19}$$

式中 C_d ——需求功率（欧元/kW）；
 C_e ——能量价格（欧元/kWh）；
 h ——工作时间（h）；
 S_L ——负荷的平均视在功率（kVA）；
 S_r ——变压器的额定功率（kVA）；
 F_c ——资本化因素。

能源价格从 EUROSTAT 中得出，除去 VAT 的能源价格已经在计算中考虑到了（见图 3.10）。需要率已经通过意大利的海关为 MV 的无国界消费者的结构中得出。

在基本的方案中，已经假设一个典型的工业变压器的使用寿命为 10 年。当然对于 15 年和 20 年的计算也已经得出。能源价格和负荷曲线都在变压器的寿命中考虑到了。

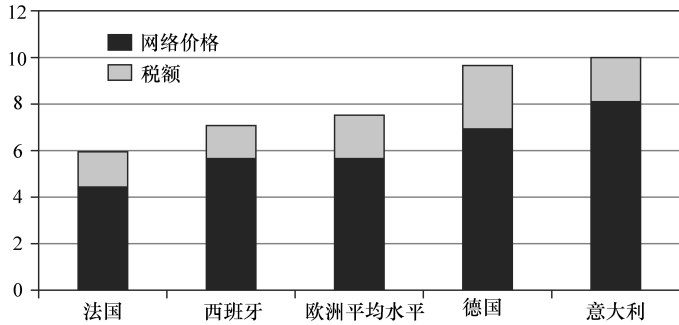


图 3.10 能源价格（24GWh/年 - c 欧元/kWh - 0.1Y/kWh）

3.7.2 结果

在新等级下的主要结果可以被归纳如下：

- 1) $B_k - D_0$ 型变压器显示了最低的 TOC；
- 2) 考虑到 TOC，增大变压器的尺寸以达到最大效率等级不是一个可行的办法；
- 3) 两种方法的结合看来没有综合效果，相反 $B_k - D_0$ 型看起来更加有吸引力；
- 4) $B_k - D_0$ 型的方案显示了最低的回馈时间；
- 5) 新的 $A_k - B_0$ 列表显示了 TOC 节约量的可比较值，但由于更高的投资成本，需要更长的投资回馈时间。

图 3.11 显示了 TOC 的组成。图 3.12 ~ 图 3.17 比较了不同工业用户和不同变

压器种类的 TOC。

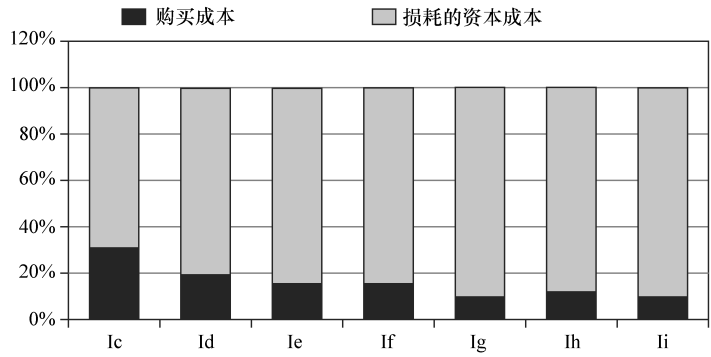


图 3.11 E_0D_k 型变压器的 TOC 组成

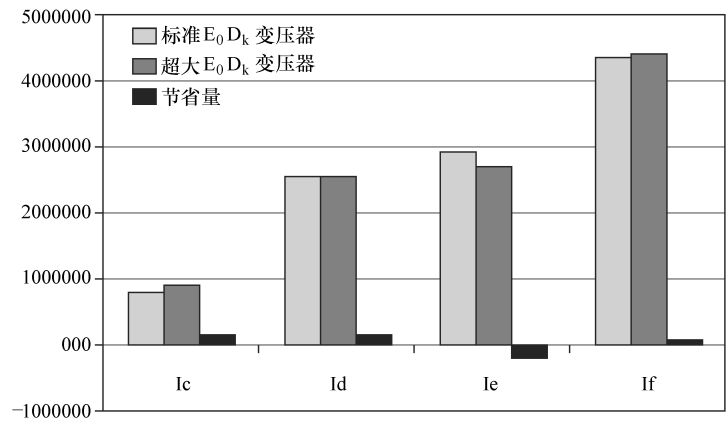


图 3.12 超大型 E_0D_k 型变压器的 TOC 值（欧元）

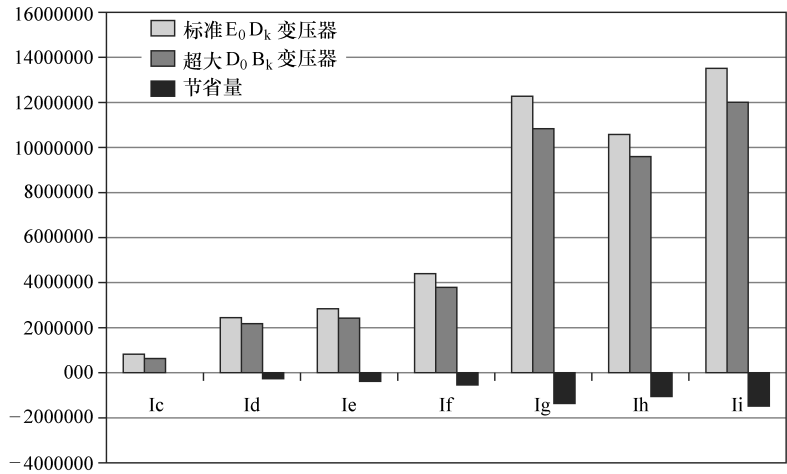


图 3.13 D_0B_k 型变压器的 TOC 值（欧元）

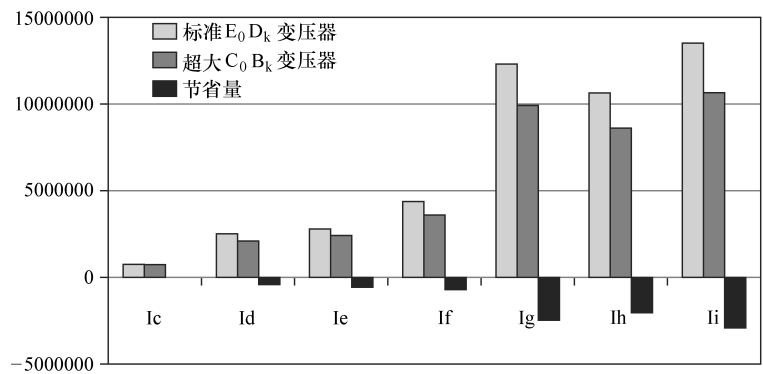


图 3.14 C_0B_k 型变压器的 TOC 值（欧元）

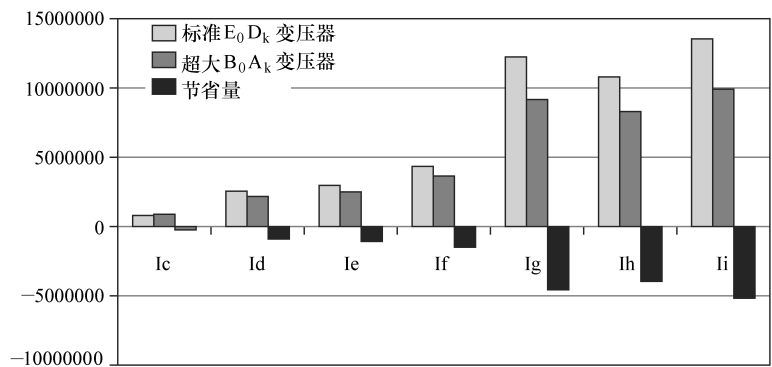


图 3.15 B_0A_k 型变压器的 TOC 值（欧元）

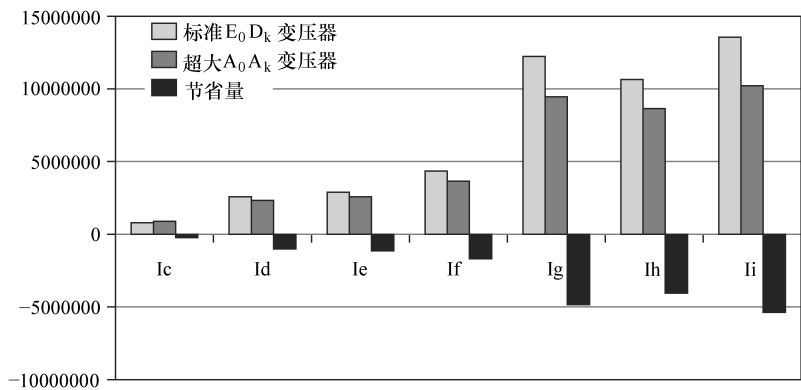


图 3.16 A_0A_k 型变压器的 TOC 值（欧元）

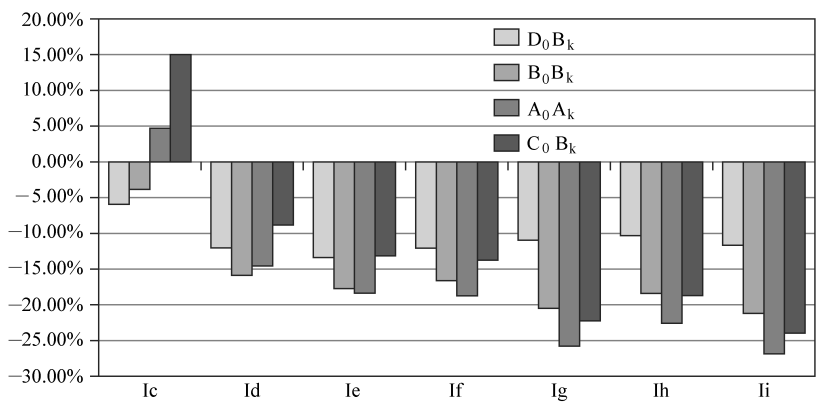


图 3.17 TOC 节省量的比较

3. A 附录

3. A. 1 MEPS 选录

3. A. 1. 1 澳大利亚

配电变压器的最低能源性能标准（MEPS）被设定为根据 AS2374. 1. 2 规定的 50% 的额定负荷条件下的功率效率水平，其测试条件为 AS2374. 1 或 AS2735 规定的测试条件（见表 3. 16 和表 3. 17）。澳大利亚还有一个适用于高能量效率变压器的标准，其效率高于正规最低能源性能标准 20%。

表 3. 16 油浸式变压器的最小功率效率水平

类型	kVA	50% 负荷时的功率效率（%）
单相（以及 SWER）	10	98. 30
	16	98. 52
	25	98. 70
	50	98. 90
三相	25	98. 28
	63	98. 62
	100	98. 76
	200	98. 94
	315	99. 04
	500	99. 13
	750	99. 21
	1000	99. 27
	1500	99. 35
	2000	99. 39
	2500	99. 40

表 3.17 干式变压器的最小功率效率水平

		50% 负荷时的功率效率（%）	
类型	kVA	$U_m = 12\text{kV}$	$U_m = 24\text{kV}$
单相（以及 SWER）	10	97.29	97.01
	16	97.60	97.27
	25	97.89	97.53
	50	98.31	97.91
三相	25	97.17	97.17
	63	97.78	97.78
	100	98.07	98.07
	200	98.46	98.42
	315	98.67	98.59
	500	98.84	98.74
	750	98.96	98.85
	1000	99.03	98.92
	1500	99.12	99.01
	2000	99.16	99.06
	2500	99.19	99.09

3. A. 1. 2 美国

美国能源部液浸式配电变压器的最小效率等级。

正如澳大利亚，在美国，对于液体绝缘的变压器（见表 3.18）和干式变压器（见表 3.19 和表 3.20），在最高技术等级上也有更高的要求。最高技术等级表示在不计成本和所有设计工作重点只关注尽可能高的效率水平的条件下的变压器设计。换言之，最高技术等级代表了在 2007 年 10 月美国能源部门发表的最终决则中所考虑的能源效率上限。这些能源效率上限大致高于最低能源效率标准的效率数值 20% ~ 30%。

表 3.18 液体油浸式配电变压器

单相		三相	
kVA	效率（%）	kVA	效率（%）
10	98.62	15	98.36
15	98.76	30	98.62
25	98.91	45	98.76
37.5	99.01	75	98.91
50	99.08	112.5	99.01
75	99.17	150	99.08
100	99.23	225	99.17
167	99.25	300	99.23
250	99.32	500	99.25
333	99.36	750	99.32
500	99.42	1000	99.36
667	99.46	1500	99.42
833	99.49	2000	99.46

表 3.19 60Hz 中压干式配电变压器

单相效率（%）				三相效率（%）			
kVA	20 ~45kV	46 ~95kV	≥96kV	kVA	20 ~45kV	46 ~95kV	≥96kV
	BIL	BIL	BIL		BIL	BIL	BIL
15	98.10	97.86		15	97.50	97.18	
25	98.33	98.12		30	97.90	97.63	
37.5	98.49	98.30		45	98.00	97.86	
50	98.60	98.42		75	98.33	98.12	
75	98.73	98.57	98.53	112.5	98.49	98.30	
100	98.80	98.67	98.63	150	98.60	98.42	
167	98.96	98.83	98.80	225	98.73	98.57	98.53
250	99.07	98.95	98.91	300	98.82	98.67	98.63
333	99.14	99.03	98.99	500	98.96	98.83	98.80
500	99.22	99.12	99.09	750	99.07	98.95	98.91
667	99.27	99.18	99.15	1000	99.14	99.03	98.99
833	99.31	99.23	99.20	1500	99.22	99.12	99.09
—				2000	99.27	99.18	99.15

注：BIL 指基本脉冲绝缘水平。根据美国能源部的测试程序，所有的效率值为铭牌额定载荷的 50%。
10CFR Part431， Subpart K， AppendixA。

表 3.20 60Hz 中压干式配电变压器

单相		三相	
kVA	效率（%）	kVA	效率（%）
10	97.7	15	97.0
15	98.0	30	97.5
25	98.2	45	97.7
37.5	98.3	75	98.0
50	98.5	112.5	98.2
75	98.6	150	98.3
100	98.7	225	98.5
167	98.8	300	98.6
250	98.9	500	98.7
333	97.7	750	98.8
		1000	98.9

3. A. 1. 3 欧洲

3. A. 1. 3. 1 欧洲 EN 50464—1 标准—液体填充变压器

具有不同额定电压和短路阻抗的液浸变压器损失的欧洲标准在表 3.21 ~ 表 3.23 中列出。

表 3.21 欧洲，液体填充，电压 24kV 以下，负荷损耗

		相对短路电压 u_k			油浸式变压器/W			
		D _K	C _K		B _K		A _K	
		≤24kV	≤24kV	≤36kV	≤24kV	≤36kV	≤24kV	≤36kV
额定功率	S_n /kVA	P_K	P_K	P_K	P_K	P_K	P_K	P_K
50	4%	1350	1100	1450	875	1250	750	1050
100	4%	2150	1750	2350	1475	1950	1250	1650
160	4%	3100	2350	3350	2000	2550	1700	2150
250	4%	4200	3250	4250	2750	3500	2350	3000
315	4%	5000	3900		3250		2800	
400	4%	6000	4600	6200	3850	4900	3250	4150
500	4%	7200	5500		4600		3900	
630	4%	8400	6500	8800	5400	6500	4600	5500
630	6%	8700	6750		5600		4800	
800	6%	10500	8400	10500	7000	8400	6000	7000
1000	6%	13000	10500	13000	9000	10500	7600	8900
1250	6%	16000	13500	16000	11000	13500	9500	11500
1600	6%	20000	17000	19200	14000	17000	12000	14500
2000	6%	26000	21000	24000	18000	21000	15000	18000
2500	6%	32000	26500	29400	22000	26500	18500	22500

表 3.22 欧洲，液体填充，电压 24kV 以下，空载损耗

空载损耗油浸式变压器										
额定功率 S _n	E ₀		D ₀		C ₀		B ₀		A ₀	
	≤24kV		≤24kV		≤24kV		≤24kV		≤24kV	
	P ₀	噪声	P ₀	噪声	P ₀	噪声	P ₀	噪声	P ₀	噪声
/kVA	/W	/dB (A)	/W	/dB (A)	/W	/dB (A)	/W	/dB (A)	/W	/dB (A)
50	190	55	145	50	125	47	110	42	90	39
100	320	59	260	54	210	49	180	44	145	41
160	460	62	375	57	300	52	260	47	210	44
250	650	65	530	60	425	55	360	50	300	47
315	770	67	630	61	520	57	440	52	360	49
400	930	68	750	63	610	58	520	53	430	50
500	1100	69	880	64	720	59	610	54	510	51
630	1300	70	1030	65	860	60	730	55	600	52
630	1200	70	940	65	800	60	680	55	560	52
800	1400	71	1150	66	930	61	800	56	650	53
1000	1700	73	1400	68	1100	63	940	58	770	55
1250	2100	74	1750	69	1350	64	1150	59	950	56
1600	2600	76	2200	71	1700	66	1450	61	1200	58
2000	3100	78	2700	73	2100	68	1800	63	1450	60
2500	3500	81	3200	76	2500	71	2150	66	1750	63

表 3. 23 欧洲，液体填充，电压 36kV 以下，空载损耗

空载损耗油浸式变压器						
额定功率 S_n/kVA	C_{036}		B_{036}		A_{036}	
	$\leq 36\text{kV}$		$\leq 36\text{kV}$		$\leq 36\text{kV}$	
	P_0/W	噪声 /dB (A)	P_0/W	噪声 /dB (A)	P_0/W	噪声 /dB (A)
50	230	52	190	52	160	50
100	380	56	320	56	270	54
160	520	59	460	59	390	57
250	780	62	650	62	550	60
400	1120	65	930	65	790	63
630	1450	67	1300	67	1100	65
800	1700	68	1450	68	1300	66
1000	2000	68	1700	68	1450	67
1250	2400	70	2100	70	1750	68
1600	2800	71	2600	71	2200	69
2000	3400	73	3150	73	2700	71
2500	4100	76	3800	76	3200	73

3. A. 1. 3. 2 欧洲 EN50541 –1，干式变压器

具有不同额定电压和短路阻抗的干式变压器损失的欧洲标准在表 3. 24 ~ 表 3. 28 中列出。

表 3. 24 欧洲，干式额定电压 $\leq 12\text{kV}$ ，短路电压占 4%

	P_K	P_K	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}
S_r	A_k	B_k	A_0		B_0		C_0	
kVA	W	W	W	dB (A)	W	dB (A)	W	dB (A)
100	1800	2000	260	51	330	51	440	59
160	2500	2700	350	54	450	54	610	62
250	3200	3500	500	57	610	57	820	65
400	4500	4900	7000	60	880	60	1150	68
630	6700	7300	1000	62	1150	62	1500	70

表 3. 25 欧洲，干式额定电压 $\leq 12\text{kV}$ ，短路电压占 6%

	P_K	P_K	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}
S_r	A_k	B_k	A_0		B_0		C_0	
kVA	W	W	W	dB (A)	W	dB (A)	W	dB (A)
100	1800	2000	260	51	330	51	440	59
160	2600	2700	350	54	450	54	610	62

(续)

	P_K	P_K	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}
S_r	A_k	B_k	A_0		B_0		C_0	
kVA	W	W	W	dB (A)	W	dB (A)	W	dB (A)
250	3400	3500	500	57	610	57	820	65
400	4500	4900	700	60	880	60	1150	68
630	7100	7300	1000	62	1150	62	1500	70
800	8000	9000	1100	64	1300	65	1800	71
1000	9000	10000	1300	65	1500	67	2100	73
1250	11000	12000	1500	67	1800	69	2500	75
1600	13000	14500	1800	68	2200	71	2800	76
2000	15500	18000	2200	70	2600	73	3600	78
2500	18500	21000	2600	71	3200	75	4300	81
3150	22000	26000	3150	74	3800	77	5300	83

表 3.26 欧洲，干式额定电压 17.5kV 和 24kV，短路电压占 4%

	P_K	P_K	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}
S_r	A_k	B_k	A_0		B_0		C_0		D_0	
kVA	W	W	W	dB (A)	W	dB (A)	W	dB (A)	W	dB (A)
100	1350	1750	330	51	360	51	400	59	600	59
160	1800	2500	450	54	490	54	580	62	870	62
250	2700	3450	640	57	660	57	800	65	1100	65
400	3800	4900	850	60	970	60	1100	68	1450	68
630	5300	6900	1250	62	1270	62	1600	70	2000	70

表 3.27 欧洲，干式额定电压 17.5kV 和 24kV，短路电压占 6%

	P_K	P_K	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}
S_r	A_k	B_k	A_0		B_0		C_0	
kVA	W	W	W	dB (A)	W	dB (A)	W	dB (A)
100	1800	2050	280	51	340	51	460	59
160	2600	2900	400	54	480	54	650	62
250	3400	3800	520	57	650	57	880	65
400	4500	5500	750	60	940	60	1200	68
630	7100	7600	1100	62	1250	62	1650	70
800	8000	9400	1300	64	1500	64	2000	72
1000	9000	11000	1550	65	1800	65	2300	73
1250	11000	13000	1800	67	2100	67	2800	75
1600	13000	16000	2200	68	2400	78	3100	76
2000	16000	18000	2600	70	3000	70	4000	78
2500	19000	23000	3100	71	3600	71	5000	81
3150	22000	28000	3800	74	4300	74	6000	83

表 3.28 欧洲，干式额定电压 36kV，短路电压占 6%

	P_K	P_K	P_K	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}	P_0	L_{wa}
S_r	A_k	B_k	C_k	A_0		B_0		C_0	
kVA	W	W	W	W	dB (A)	W	dB (A)	W	dB (A)
160	2500	2700	2900	850	57	900	62	960	66
250	3500	3800	4000	1000	59	1100	64	1280	67
400	5000	5400	5700	1200	61	1300	65	1650	69
630	7000	7500	8000	1400	63	1600	68	2200	71
800	8400	9000	9600	1650	64	1900	69	2700	72
1000	10000	11000	11500	1900	65	2250	70	3100	73
1250	12000	13000	14000	2200	67	2600	72	3600	75
1600	14000	16000	17000	2550	68	3000	73	4200	76
2000	17000	18500	21000	3000	72	3500	74	5000	78
2500	20000	22500	25000	3500	73	4200	78	5800	81
3150	25000	27500	30000	4100	76	5000	81	6700	83

3. A. 1. 3. 3 提出的欧洲 MEPS

欧洲提出的 MEPS 定义如下：

- 1) 油浸式变压器：容量≤630kVA： A_0C_k ，容量>630kVA： A_0A_k 。
- 2) 另外，如果第 1 条中的条件对于通用的 MEPS 是不可实现的，那么，可选的低损耗心材（在 1.7T 和 50Hz 条件下≤0.95W 1kg）被认定为最低要求。
- 3) 干式变压器： A_0A_k 。

3. A. 1. 4 损失评估公式—美国 and 欧洲

表 3.29 列出了用于分析变压器损耗的选定公式。

表 3.29 变压器的损耗分析中使用的选定公式

美国					欧洲	
项目		定义	名称	符号	定义	名称
1	全年 峰值 (kW)	峰值功率 (kW)	峰值	P	每年最大的功率	峰值功率
2	功率 因数	负 荷 (kVA) /功 率 (kW)	功率 因数	$\cos \varphi$		
3	全年 PU 峰值	变压器高峰负荷与额定 功率之比 全年 PU 峰值 = 峰值/ S_B $\times$ 功率因数	全年 PU 峰值	B_{av}	$\beta_s = \frac{P}{\cos \varphi S_n}$	相对高峰负荷
4	每年 PU 平 均负荷	每 年 PU 平 均 负 荷 $= \frac{\text{每年能源}}{8760 S_B \times \text{功率因数}}$	每年 PU 平 均负荷	B_{av}	$\beta_{av} = \frac{E}{8760 S_n \cos \varphi}$	相对平均负荷

(续)

美国				欧洲		
项目		定义	名称	符号	定义	名称
5	每年损失系数	平均负荷损失与高峰负荷损失之比 $L_s F = \left(\frac{S_{\text{RMS}}}{\text{峰值}} \right)^2$	$L_s F$	无等效项		
6	负荷系数	平均负荷与峰值负荷之比	LF	T_w	$T_w = \frac{T_s}{8760}$	峰值负荷的相对时间 $T_s = E/P_s$ 式中 E ——能量 (kWh)
7		$L_s F = LF^{1.732}$ 或 $L_s F = 0.85LF^2 + 0.15LF$		无等效项, 但是 $\tau_w = T_w^{1.7}$		
8	所有变压器每年平均单位 (PU) 的负荷	PU 负荷 = $\frac{\text{价格 (MWh)}}{8760 \times \text{安置 MVA} \times \text{功率因数}}$	PU 负荷 = S	$\beta * av$	$\beta * av = \frac{\sum E[\text{kWh}]}{8760 N S_n \cos \varphi}$ 式中 S_n ——变压器的额定功率; N ——变压器数量	平均相对负荷
9	PU 负荷	PU 负荷 = $S = \frac{E}{8760 \times \text{峰值} \times \text{功率因数}}$	S	β_{av}	$\beta_{av} = \frac{E}{8760 S_n \cos \varphi}$	平均相对变压器负荷
10	全年 PU 负荷因数	PU 负荷因数 = $\frac{E}{8760 \times \text{峰值} \times \text{功率因数}}$	PU 负荷/功率因数	$\frac{T_w}{\cos \varphi}$	$\frac{T_w}{\cos \varphi} = \frac{E}{8760 P_s \cos \varphi}$ $= \frac{T_s}{8760 \cos \varphi}$	高峰负荷的相对持续时间
11	每年 PURMS 负荷	$(S_{\text{RMS}})^2 = L_s F (\text{峰值})^2 \times 8760 \Delta P_z$ (S_{RMS}) ² = 全年损失能量 $S_{\text{RMS}} \approx 1, 1S$	$S_{\text{RMS}} \text{PU}$	每年的能源损失: $8760 \Delta P_z \beta_s \tau_w$ 因此: $(S_{\text{RMS}})^2 = (\beta_s)^2 \tau_w$		相当于每年的平均负荷产生的年平均损失

参 考 文 献

[1] Ecodesign Preparatory Study ENTR Lot 2: Distribution and Power Transformers. <http://www.ecotransformer.org>

深入阅读材料

- M. Agostini, A. Clò, G. Goldoni: *Mercato dei trasformatori e risparmio energetico*, Quaderni di Enegia n°1.
 ANIE web site (www.anie.it);
 APEC Energy Standard Information System <http://www.apec-esis.org/>
 Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG) web site (<http://autorita.energia.it>)
 R. Baehr, State of Art Paper, CIGRE Electra 13 no. 195 October 2001
 A. Baggini and F. Bua *Criteri di scelta di trasformatori di potenza MT/BT industriali a perdite ridotte*, Power Technology, Ed. Delfino,
 CEI EN 60076-1: *Power transformers. Part 1: General*, III edition.
 ENEL web site (www.enel.it);
 EUROSTAT – Electricity prices for EU industry on January 2002.
 Gestore della Rete Nazionale (GRTN) web site (<http://www.grtn.it>);
 Global transformer markets 2002–2012 prepared for International Copper Association, Goulden Reports, 2008
 R. Hasegawa and D. C. Pruess, *Impact of Amorphous Metal Based Transformers on Efficiency and Quality of Electric Power Distribution*, 2004, 0-7803-7031-7, ©2001 IEEE.
 Strategies for energy efficient distribution transformers – SEEDT, Energy Intelligent Europe Programme project 1985–1988, <http://seedt.ntua.gr>
 Stefan Fassbinder, Roman Targosz, *Energy Efficient Transformers*, Leonardo ENERGY, 2012.

第 4 章 楼宇自动化、控制和管理系统

Angelo Bagginì 和 Annalisa Marra

在能源背景下，西方主要国家中历来被工业和交通运输业蒙上阴影的民政部门已经变得越来越重要。

例如，在欧洲大约 40% 的能源消耗在民政部门，其中的 70% 是住宅方面，30% 是第三产业方面。因此，第三产业和住宅成为了减小消费的重要部分。

自动化除了可以当作主要用于处理负荷、组件性能和建筑物隔热的普遍工具外，还可以在降低能源消耗上发挥重要的作用，而不会影响对服务的发展和完善。

建设和过程的管理，既要效率高又要效果好：

- 1) 例如高效地建立一个隔热最优化的围墙；
- 2) 例如在能量过程管理方面要有效，尤其是热量和电力方面。

管理可以由人类或自动化系统进行。自动化可以帮助纠正人们那些产生不必要消费的行为，通过帮助和指导用户对设备进行最优化管理，最终节约了能源并促进了环境的可持续发展。

然而，迄今为止，与其他科技的发展相比，楼宇自动化系统[⊙]还没有实现建筑节能的广泛发展。造成这种情况的原因有很多。首先，尽管自动化系统有显而易见的优势，但是人们对于自动化系统技术仍然知之甚少：一方面，由于终端用户的误传；另一方面，由于一些专家对于革新的阻力。此外，在住宅领域，自动化系统的实行，包括一种要求与终端用户真正的设计和协调的新方法。

然而主要的原因是这些系统与传统的相比成本较高，并且因为这种能量效率技术很少得到现在政府的经济支持。

这种利用可再生能源的技术十分昂贵，但仍在世界各地取得了巨大的成功，这主要是由于公共社会的支持。

此外，通过自动化系统来对节约的能源和成本的估计是相当微妙和复杂的。

在实践中，自动化系统可以比人工更好地节约能源，主要有以下两个方面的原因：

⊙ 楼宇自动化、控制和管理系统根据资源和水平分为不同的缩略语：BACS 是楼宇自动化和控制系统，在 CEN 内；HBES 是家用和楼宇电子系统，在 CENELEC 内；还有 TBM，即楼宇技术管理，在 CEN 内。这种分类的使用存在一些不确定性，甚至在原来的标准化文件中有时也发现这样的问题。在本书中，即使因简化而没有规定需求，除非另有规定，自动化或者自动化系统的条目通常指安装有自动化、控制和管理系统的楼宇，无论是在第三产业还是住宅区。

1) 人们没有给予节约能源足够的重视，因为他们的精力都集中在他们的其他主要活动中。

2) 人的感官对于认识到实时的需要和可能关闭的服务是不敏感的。例如，灯光在早上日出前打开。在白天光亮供大于求，但我们的感观不能立即察觉到光照强度超过所需的最低水平，只有当光强超过所需太多时，我们才能察觉到。

4.1 节约能源的自动化功能

一些专注于舒适度自动化的功能，在降低消耗方面可以发挥重要的作用。

其基本思想是非常简单的：为了自动化和最优化利用现有的（电气和非电气）能源技术在建筑物内使用，当不需要时，可以将它关闭。

在一般情况下，节约能源是典型的、简单的自动化任务，并且成本要低于那些相关的其他应用类（见表4.1）。

图4.1和图4.2显示了在第三产业及住宅区能源消耗的百分比。

可以很容易地看出，采暖能耗在这两种情况下都高，而照明用电在第三产业中占主导地位（在工作时间内的写字楼及商场需要高能源消耗）。

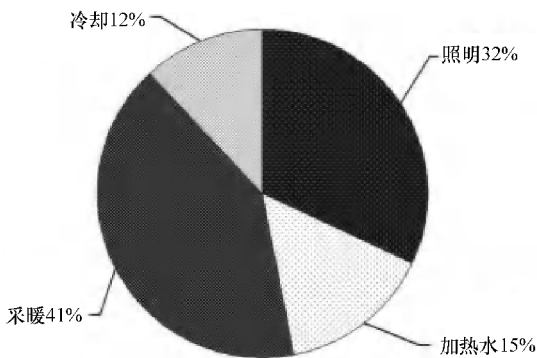


图 4.1 第三产业的能源消耗（意大利）

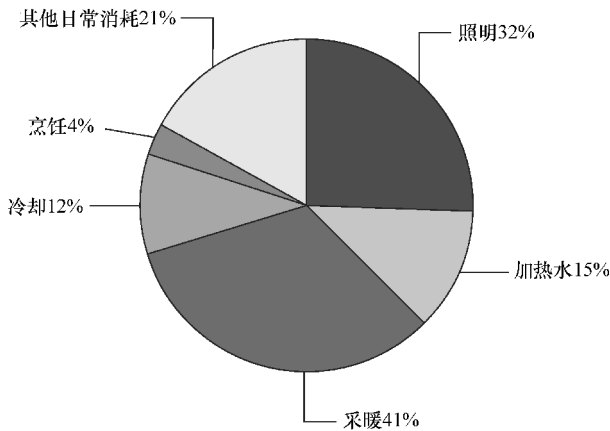


图 4.2 居民的能源消耗（意大利）

表 4.1 自动化系统应用分类

类别 1	
命令 警报器 声音传播	照明、暖气装置、通风、空调、一般驱动 救援、干扰、漏气、火灾、洪水、技术报警 控制
类别 2	
声音传播 通信	扬声器 电话等
类别 3	
通信	宽带视频

4.1.1 温度控制

限制加热或冷却时间和气候条件以满足现实的需要，使住宅及第三产业实现能源消耗显著减少成为可能。

最重要的用于减少能耗的通过控制温度的自动化功能如下：

- 1) 微区具有独立的自动调温器和阀门，以同时优化舒适性和消耗，而不是由中央控制或者不控制。
- 2) 室内空气质量（IAQ）控制：传感器对空气质量进行分析，只有当空气变得不新鲜时才激活交换系统，而不是周期性地激活空气交换系统。
- 3) 空气交换应该在冬天不太冷或夏天不太热的时候，以防止过高的温度差造成交换器的损坏。
- 4) 将温度控制与气象站（雨、风、亮度）相结合，以避免损失同时控制遮阳篷、百叶窗、户外照明和灌溉。
- 5) 根据天气条件来控制门窗的开闭以实现调整室内气候状况。
- 6) 引入局部或集中的在不同的模式〔舒适，预舒适（Precomfort）、省电、关闭〕之间手动切换的可能性。
- 7) 引入防冻保护功能，以保护家具和设备在偶然环境下的故障。
- 8) 涉及了保持机械设备在只加热的情况下的维护和最有效的运行条件，阀在夏季长时间停顿造成的黏性可通过设置一个功能避免，它周期性地打开和关闭机电设备（防黏）。

4.1.2 采光

在不同时期，限制人工照明至实际所需的时间，这对电能消费可能有重要影响，尤其是在对应消费更重要的服务行业。

通过作用于灯光而减少能耗的自动化系统很可能有以下功能：

- 1) 所有的灯具自动开关照明（通过定时器、传感器、光线的明暗水平），而不是手动（通过传统的命令或遥控器）。
- 2) 通过光传感器控制的标志灯或 LED 或一般照明电器电源开关。

- 3) 根据运动（高流量地区）或占用，自动开关照明开启和关闭。
- 4) 外部设备和灯光的自动控制和用一个昏暗的光线标准展示。
- 5) 一个非关键设备组的临时开关。
- 6) 通过电子设备调整光强，增加或减少光级的过程使用传感器，而不是传统的各种手动命令。
- 7) 最大限度地综合利用自然采光与人工照明，仅在需要时进行亮度的自动化控制。
- 8) 在不同的通过编程以实现最优化资源使用寿命的设备群体之间进行切换，以优化资源的使用寿命。
- 9) 通过日常维护和优化，可以对一种机器的操作时间进行统计。
- 10) 指向总线的重复命令（个人和团体），会增加有效人为干预的可能。

4.1.3 驱动器和电动机

减少消耗量的自动化功能也和驱动一样包含附加消耗值。但由于种种原因，包括延迟和缺乏人的感官的灵敏度，积极地平衡很容易实现，因为在统计和实践上人类行为几乎都不是那么有效。

基于可以减少消耗的驱动器的自动化系统的主要功能如下：

- 1) 百叶窗的窗户和门可以自动关闭。为了节省能量损失，开、关门可以由微动开关，具体情形和定时器控制，也可以由遥控器、光线传感器或者由可以测风速和下雨与否的气象站控制。类似地，遮篷也可以实现自动控制。
- 2) 百叶窗：向上/向下移动和调整叶片角度。
- 3) 集成电门锁。
- 4) 灌溉系统：计划开始和结束时间来开启或关闭水阀或者基于光照，避免下雨时的水浪费，同时也避免了破坏植物。
- 5) 集成的系统管理池。
- 6) 手动或自动控制遮阳设备（窗帘、百叶窗等）。如向上、向下、开启、关闭或倾斜的板条的操作可以自动根据太阳的位置来进行，减少夏天阳光直射的同时以减少空调的需求（节能），还可以实现眩光防护（更大的视觉舒适度工作站屏幕）。
- 7) 集成的会议室、多功能厅、展厅等的指挥和控制方案。
- 8) 天气警报（雨、风、霜）可以最大限度地利用遮阳装置，把它们放到一个安全的位置或者在必要的时候阻止它们出现。

4.1.4 技术报警和管理

在限制建筑消耗量中，技术报警器也可以发挥积极的作用：比如在异常状态一出现就监测到，这样可以避免系统在高能耗、低效率的状态下运行。

可以减少建筑耗能的自动化系统的主要功能如下：

- 1) 检测有害气体如甲烷、液化石油气（LPG）、一氧化碳（厨房、车库、壁炉和火炉附近），烟雾，火灾，洪水等。

- 2) 在给定情况下关闭气体及水的电磁阀。
- 3) 将执行机构和插头插座结合起来可以被用户选择关闭，以消除在待机情况下用电器的消耗，而不需要关闭连续供电设备的电源。
- 4) 防止继电器误动作的自动复位保护。
- 5) 安装管理。
- 6) 通过电话或网络的双向控制调度事件。
- 7) 环境和/或电参数的监测和记录用于趋势分析。

4.1.5 远程控制

远程控制系统可以帮助减少建筑物的消耗，在意想不到的情况下允许直接的人为干预。需要有在意外发生时就直接干预的能力，以避免系统可能在高耗能、低功率的条件下运行。

基于远程控制以减少消耗的自动化系统的功能如下：

- 1) 总线设备的控制。
- 2) 查询总线设备的状态。
- 3) 传递报警或者事件。
- 4) 命令和/或多个协调功能的控制。

4.2 自动化系统

在通信能力中，可以发现传统电力系统和自动化系统的分界线，每个发展为自动化系统的设备如下：

- 1) 传统控制设备中，低压电力系统直接作用在控制用户的电源电路。
- 2) 在自动化系统中，控制电路和电源电路相分开。前者包括一个信号控制设备和制动器的网络，通过利用自带的电子处理和通信装置，可以交换以数字形式编码的信息。需要电力供应才能操作的设备和负荷连接到了电力网络（电源总线），为了便于控制，有一根信号总线。不需要电源供应来操作的设备，例如命令按钮，只连接到信号总线。

传统系统所能实现的应用，在实践中，与自动化系统能实现的应用不同。因为只需要一点更清楚的逻辑表达，传统布线系统复杂性就会指数增长使实施变得十分不切实际。

带有自动化系统的应用建筑可以用表 4.1 归类。

那些人们感兴趣的可以节能的地方如类别 1，有时候会混淆 SCADA（监管控制和数据采样）系统和分布式控制系统（DCS）。一般来说，SCADA 系统通常是指一个协调但不实时控制过程的系统。通过新的电信技术，实时控制有一些模糊的讨论。这种新的电信技术可以在广泛的领域可靠、低延迟、高速通信。SCADA 系统和 DCS 之间的最大的差异是由不同文化决定的，通常可以忽略。随着高容量通信

基础设施的实现，SCADA 系统和 DCS 之间的差异会逐渐消失。SCADA 系统和 DCS 的比较如下：

- 1) DCS 是面向过程的，而 SCADA 系统是面向数据采集的。
 - 2) DCS 是过程驱动的，而 SCADA 系统是事件驱动的。
 - 3) DCS 通常在单一区域处理操作，而 SCADA 系统更适于处理那些分布很广泛的应用。
 - 4) DCS 的操作位置通常在它的 I/O 接口，而 SCADA 系统未能进行现场通信。
- DCS 的元素可以直接关联到实际设备，比如开关、水泵和闸门，或者通过一个中间系统来工作，例如 SCADA 系统。

4.2.1 KNX 系统

KNX[⊖]系统是一个特定的 DCS，包括一系列的 I/O 接口连接到公共传输介质、总线，再加上一些操作必需的系统设备。网络中的每件设备交换包含一组数据点的信息。例如每个设备解释的控制和过程中的可变因素。数据点往往是输入、输出、参数和诊断数据。

这些简单的通信规则和传输介质的特性一起构成 KNX 系统的体系架构。
一个 KNX 系统是一个分布式计算网络（也就是没有设备是系统的逻辑中心），它的节点有一个单独的 16 位地址。因此，在理论上，可以定义 65536 个设备地址。

4.2.1.1 建筑

通过分析 KNX 网络的路由规则和一些电气规则，获得的整体架构如图 4.3 所示。

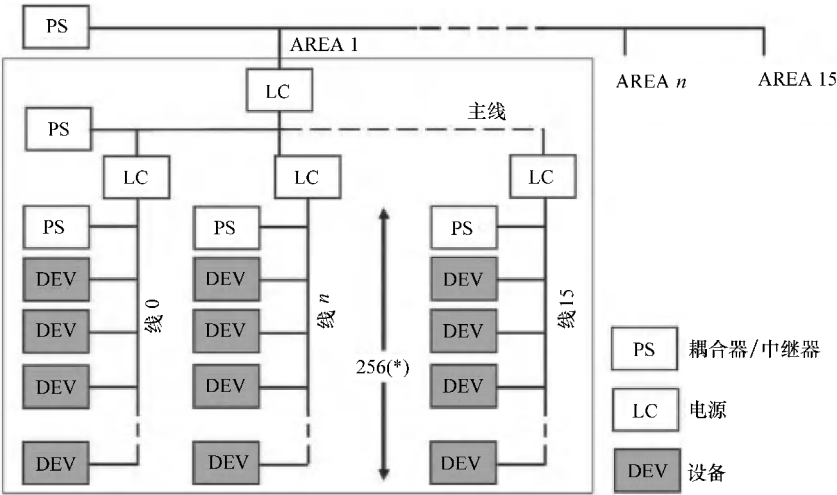


图 4.3 KNX 网络的整体架构（通过 LC 隔开的每条线最多由 4 个部分组成，每个部分最多 64 个设备）

⊖ 在市场上可以找到 DCS 中，KNX 系统是唯一一个由国际 IEC 标准规范的。作者以为，标准化可能是自动化建筑未来发展的一个关键问题。

1. 区、行式设备

KNX 技术，线路水平，允许任何拓扑结构：星形，树形，总线形，但不包括环形。最多 256 个设备组成一条线。最多 15 条线可以连到主线上构成一个区域。一个 KNX 装置可以容纳 15 个区域，由一条骨干线相连。

2. 物理地址

KNX 网络的每一个部分除去电源，可以通过物理地址唯一确定。该地址由被点分割的 3 个数值段组成：

- 1) 1 字段定义了区域的属性（范围为 0 ~ 15）；
- 2) 2 字段指示行（范围为 0 ~ 15）；
- 3) 3 字段标识移动设备（范围为 0 ~ 255）。

3. 集团地址

系统中的设备通过 KNX 组地址来相互通信。通常情况下，该组地址的结构层次结构中有 3 个层次：

- 1) 主要群组通常是系统级（如灯光、温度控制等）；
- 2) 被认为是系统的特有特征的组（如开关、调光器等）；
- 3) 亚组，设备属于相同的功能（如光的厨房、卧室的窗户等）。

通过定义了主群组，主组和子组使用正斜杠（/）间隔分离数值段来表示集团地址。还设有一个版本但是在两个水平的路由组中，它是较少使用的。

4. 电源供应器

电源供应器是一件用来给连接在总线上的设备供电的设备。电源供应器通常是直接提供电源电压，并直接给总线端子提供 29V 的直流电压。

5. 耦合器（行、场、中继器）

在考虑到设备的功率消耗和总的最大电流时，一个有电源供应的总线通常最多由 64 个连接设备来确定。

然而，每一条线上的 KNX 理论上可以有 256 个设备连接到总线上，如果每条线有 4 个分段组成（见图 4.4），每个分段都有自己的电源供应，它们由中继器连接到一起。

中继器只是一种特殊的耦合器使用方式，这种方式可以电分离总线和再生信号从而防止电气故障传播到其他线路，也允许扩大 KNX 系统的整体架构到最多的 65536 个设备。

耦合器装置可以以不同的方式使用：

- 1) 耦合器区域/地区：沿着干线连接耦合器区域（骨干线）；
- 2) 线耦合器/区域：在沿着主线的区域里连接线（主线）；
- 3) 中继器（升压器）连接两个线段，使衰弱的信号增强。

4) 过滤器框架：可以设置耦合器以阻止电报发送信息，从而避免在不必要的时候向网络发送信号。过滤范围增加通信能力且减少错误和信息包冲突的可能性。

耦合器可以按照任何一个 KNX 设备来编址，并且只能被 ETS 软件配置。

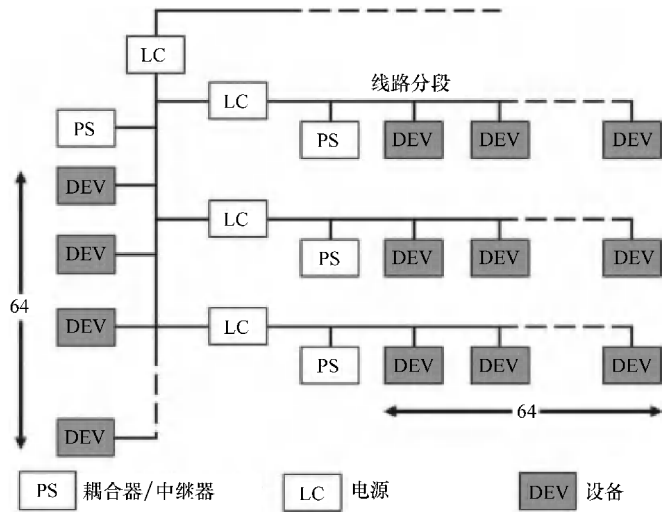


图 4.4 KNX 网络每条线的最大容量

4.2.1.2 传输介质

双绞线 TP：这是一个利用双极互绕（螺旋绕组）屏蔽和双重绝缘电缆进行通信的通信电缆。

在一个 KNX 系统中总线 TP - 1 来自 EIB，9600bit/s 的速度以待使用。通过这种传输介质 KNX EIB 可以实现互相通信和交互操作。

图 4.5 所示电缆将被认为是 KNX，因为 YCYM 类型是 1 或 2 × 2 × 0.8 × 2 × 0.8mm。在 4 号线中，红、黑线用于信号传输和电能供应，黄、白线用于额外的 SELV 应用；在有必要使用无卤素的电缆的情况下，电缆型号为 KNX 认证的 JH (St) H 2 × 2 × 0.8。

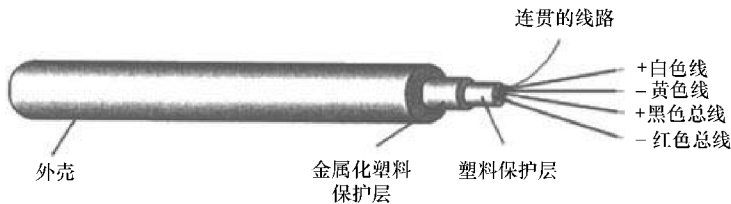


图 4.5 双绞线

4.2.1.3 电源线

PL（电源线），使用现有的电力线（交流 230V，50Hz）通信，叠加电源电压高频率波编码控制信息。这两种传输模式是：

1) PL - 110：从 EIB 传输，1200bit/s。通过这种传输方法 KNX 和 EIB 之间可以相互通信并且实现彼此同时操作。

2) PL-132：来自 EHS，2400bit/s。EHS 和 KNX 设备可以连接，但没有合适的整流器不能相互通信。

4.2.1.4 无线电波

通过 RF（射频）传输，通过无线电波通信操作 ISM（工业科学医疗）内的 868.30MHz 载波频率，速率达 16.38kbit/s。需要给信息进行数字编码的逻辑状态（0 和 1）是由于载波频率的偏差所产生的。

RF 设备根据通信可以被分成两组，即单向的或双向的。

4.2.1.5 以太网

独立的特殊的传输介质，在这种情况下通过标准 IP（互联网协议）中封装的以太网网络转移 KNX 电报以达到通信目的。

根据称为“KNX/IP 路由”的程序，在最大的装置中，IP 网络可以用来作为一个高速干路（快速主干）来发送 KNX 电报。

4.2.1.6 配置

一旦设备已安装并已连接到总线，还需要两个步骤才能使用这个装置：

1) 当物理地址被定义后，网络拓扑结构的水平：实际上这一步中建立总体的系统结构。

2) 至于节点，当每个节点的应用配置和组地址被定义后（绑定），这些组地址就是两个或两个以上的连接到 KNX 网络设备之间的逻辑联系。没有这种连接，虽然所有在网络中的设备都可以接收信息，但是不能理解所接收到的信息是它们自己的还是给别的设备发送的。

保证设备间协议和互用性的前后一致，KNX 标准允许采用不同结构方法的设备。一个 KNX 设备可以以 3 种不同的方式配置：

1) 系统（S 模式）：它必须使用带有 ETS 软件的 PC。

2) 简单（E 模式）：不需要 PC 但要其他具有编程功能的技术。

3) 自动机械（A 模式）：我们将不作进一步调查，因为它现在被消费市场认可。

表 4.2 比较了 E 模式和 S 模式的配置方法的特点。

表 4.2 E 模式和 S 模式的比较

特性	E 模式	S 模式
设备的最大容量	64	>64
网络结构	一条线路	每个区域最多有 15 条线路，最多有 15 个区域
计算机配置	“组态器”软件或者 ETS 软件	只有 ETS 软件
协议	KNX	KNX
设备功能设置	只有主要的	所有的

1. S 模式

当各种功能要求自动化控制和各种复杂的系统具有较多数量的设备、个性化特

色和空间布局（建筑自动化系统中严格意义上的）作参考时，S 模式十分理想。基于 ETS 软件并需要一台 PC。

这种方法的主要优点在于设计和配置的灵活性。

2. E 模式

E 模式配置安装在两个方面是可能的：

- 1) 使用简单的方法以减少和优化所有的必须投入服务的步骤；
- 2) 使用 ETS 系统软件。

E 模式的设备不同于 S 模式，已经包含在它们的可能的配置中，尽管限制了可用功能的数量。另一方面，大大简化了系统的调试过程。可用的功能通常足以满足国内所有的应用需求。

4.2.2 SCADA 系统

SCADA 系统一般是指监视和控制工业、基础设施建设或是基础设施的过程的计算机系统。SCADA 系统通常是指用于监视和控制整个复杂的地点或建筑物的集中式系统。

它最初被开发为：

- 1) 基础设施的过程包括电能传输和分配、风电场、民防警报器系统、水处理和分配、废水收集和处理、石油和天然气管道、大型通信系统。
- 2) 工业生产过程，包括制造、生产、发电、制造和提炼，它可能会运行在连续、批量、重复或离散模式。

它们也很快被吸纳到设施过程中，包括建筑、机场、船舶和空间站。它们监视和控制高压交流电、使用途径和能源消耗。

一个典型的 SCADA 系统由以下子系统组成：

- 1) 人机界面（HMI）是向人类操作员显示过程数据的设备，人类操作员通过 HMI 监视和控制某建筑物或某过程。
- 2) 一个监控系统，从建筑上采集数据并向它发送命令。
- 3) 远程终端单元（RTU）连接到建筑物的传感器上，将传感器信号转换成数字数据并将数字数据发送到监控系统。
- 4) 可编程逻辑控制器（PLC）作为现场设备，因为它们比专用的 RTU 更经济、灵活、多功能、可配置。
- 5) 基础通信设施将监控系统连接到 RTU。

大多数控制操作是通过 RTU 或 PLC 自动执行的。主机控制功能通常被基本覆盖或监管水平的干预所限制。例如，PLC 可以通过一个高压交流电大单元的一部分控制冷却水的流动，但 SCADA 系统可以允许运营商改变流量的设定点，并启用报警条件，如流量损失和高温，并显示和记录。反馈控制回路通过 RTU 或 PLC 时 SCADA 系统监控整体循环的性能。

数据采集从 RTU 或 DSC 标准开始，包括按照要求传达给 SCADA 系统的仪表

读数和设备状态报告。然后数据用一种方式被编译和格式化，这种方式是一个控制室的操作员使用 HMI 可以做出监督决定以调整或覆盖正常的 RTU (DSC) 控制。数据也可以被输送（往往建立在一种商品数据库管理系统上）给史学工作者，允许趋势分析和其他分析审计。

SCADA 系统代表性地会实现一个分布式数据库，通常被称为一个标签的数据库，该数据库中包含的数据元素称为标签或点。一个点代表一个单独的输入或输出值，并被系统监视或控制，点可以是硬的也可以是软的。硬点代表系统内的一个实际的输入或输出，而软点来自应用到其他点的逻辑和数学运算。大多数实现在概念上消除了不同，通过使给每个属性一个软点，可在最简单的情况下，等于一个单一的硬点。点通常以时间戳值对的形式存储：一个值，当它被记录或计算时加上一个时间戳。一系列的时间戳值对赋予那个点以历史信息。用标签存储额外的元数据也是很常见的，如现场设备的路径或 PLC 寄存器、设计时间的评论和报警信息。

4.2.2.1 HMI

HMI 是呈现给人工操作员过程数据的装置，操作人员通过这些数据控制过程。

一个 HMI 通常连接到 SCADA 系统的数据库和软件程序，提供趋势分析、诊断数据和管理信息，如定期维护程序、物流信息、一个特定的传感器或机器的详细电路图以及专家系统故障诊断指南。

HMI 系统通常以模拟图的形式生动地呈现信息给操作人员（见图 4.6）。这意味着操作者可以看到被控制的设备的图形表示。例如，一个连接到管道的泵的图片可以显示给操作者泵在运行和它通过管道最多可以抽取多少流体，然后操作员可以关闭泵。HMI 软件将实时显示管道中的减少的流体的流量。模拟图可能包含线形图和原理图符号来代表过程元素，或可能在过程设备的数码照片上附有生动的符号。

SCADA 系统的 HMI 包通常包括一个绘图程序，运营商或系统维护人员用这个绘图程序改变这些点在界面中呈现的方式。这些代表可以很简单，例如屏幕上的楼道灯代表着国家的实际楼道灯，或可以是复杂的如一个多投影显示代表在一个大的建筑物所有水泵的位置和参数。

大多数 SCADA 系统实现的一个重要组成部分是报警处理。系统监视某些报警条件是否满足，当报警事件发生时做出正确判断。一旦报警事件被检测到，将采取一个或多个动作（如激活一个或多个报警指标，也可能发出电子邮件或文本消息，告知管理人员或远距离的 SCADA 系统操作者）。在许多情况下，一个 SCADA 系统操作者可能必须告知报警事件的消息已收到，这可能会关闭一些报警指标，而其他指标保持活跃，直至报警被清除。报警条件可以是明确的（例如，报警点是一个数字状态点，不是“正常”就是“报警”，这个数字状态点根据其他模拟和数字点的值利用公式计算出来），也可以是隐式的：SCADA 系统可能会自动监测模拟点的值是否超出该点的上限和下限值。报警指示器的例子包括一个警报器，屏幕上有一

个弹出式对话框，或是在屏幕上的彩色或闪烁区域（类似于在汽车上显示的“油箱是空的”的发光字）。无论在何种情况下，报警指示器的作用是吸引操作员的注意到系统“报警”，从而采取适当的行动。设计 SCADA 系统时，需要谨慎应对在很短的时间内发生一连串的报警事件，否则根源（可能不是最早检测到的事件）可能会丢失在噪声中。不幸的是，当被用作名词时，“报警”这个词在行业中使用得相当轻率，因此，根据上下文，它可能意味着一个报警点，报警指示，或报警事件。

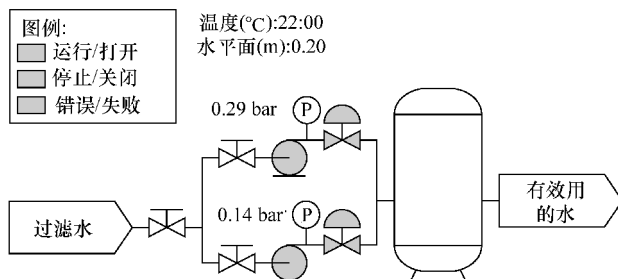


图 4.6 典型基本 SCADA 系统结构图

注：1bar = 10^5 Pa。——译者注

4.2.2.2 RTU

RTU 连接到物理设备。通常情况下，一个 RTU 把设备的电气信号转换为数字量，如一个开关或一个阀的打开/闭合状态，或者测量值，如压力、流量、电压或电流。RTU 可以通过将这些电信号转换和发送到设备从而控制设备，如一个开关或一个阀的打开或关闭，或设置一台泵的速度。它也可以控制液体的流动。

SCADA 系统解决方案往往有 DCS 组件。使用“智能”的 RTU 或 PLC 的越来越多，这些 RTU 或 PLC 能够自主执行简单的逻辑流程，而无需涉及主计算机。一个标准化控制编程语言，IEC61131-3（一套 5 种编程语言，包括功能块、梯形图、结构化文本、顺序功能图和指令表）经常被用来创建这些 RTU 和 PLC 上运行的程序。与程序语言如 C++ 或 Visual Basic 编程语言不同的是，IEC 61131-3 需要最少的培训，由于类似历史悠久的物理控制阵列。这使得 SCADA 系统工程师对 RTU 或 PLC 上执行的程序进行设计和实现。一个可编程序自动化控制器（PAC）是一个小巧的控制器，结合了基于 PC 的控制系统与一个典型的 PLC 的功能和性能。PAC 被置于 SCADA 系统，提供 RTU 和 PLC 功能。在许多变电站 SCADA 系统应用程序中，分布式 RTU 使用信息处理器或计算机与数字保护继电器（PAC 系统和其他设备的 I/O）进行通信，代替传统的 RTU 与 SCADA 系统主站进行通信。

几乎所有主要的 PLC 制造商提供集成的 HMI/SCADA 系统，其中很多使用开放的、非专有的通信协议。许多专门的第三方的 HMI/SCADA 系统软件包提供内置的与大多数主要的 PLC 兼容的程序也进入了市场，让机械工程师、电气工程师和技

术人员配置人机界面，而不需要软件开发人员编写定制程序。

4.2.2.3 监督站

“监督站”是指负责与现场设备（RTU、PLC 等）通信的服务器和软件，然后指运行在控制室或其他地方的工作站的软件。较小的 SCADA 系统的主站可能由一个单一的 PC 组成。较大的 SCADA 系统的主站可能包括多个服务器、分布式应用软件、灾难恢复站点。为了提高系统的完整性，往往多台服务器会被配置形成一个双冗余或热备用，在一个服务器发生故障情况中提供连续控制和监测。

4.2.2.4 通信基础设施和方法

SCADA 系统传统上使用无线电和直接序列或调制解调器连接的组合，以满足通信要求，虽然大的网站如铁路部门和发电站也经常使用同步光纤网/同步数据系列的以太网和 IP。但是一个 SCADA 系统的远程管理或监视功能通常被称为遥测。

一些客户希望用 SCADA 系统数据，扫过预先设定的企业网络或共享网络与其他应用程序，这也使 SCADA 系统受到了威胁。虽然传统的早期低带宽的协议遗留的问题仍然存在 SCADA 协议的设计非常简洁，许多条例设计为只有当主站对 RTU 进行民意调查时信息才发送到主站。典型的被 SCADA 系统所继承的协议包括 RTU、RP-570、现场总线和 Conitel。所有这些通信协议虽然都有特定的 SCADA 系统供应商，但却被广泛采纳和使用。标准协议是 IEC 60870-5-101 或 104、IEC 61850 和 DNP3。这些通信协议是标准的，并被所有主要的 SCADA 系统供应商认可。许多这些协议现在包含通过 TCP/IP 实现的操作扩展。虽然一些人认为避免 SCADA 系统连接到互联网是很好的安全工程的做法，这样的攻击面减少，但是许多行业，如污水收集和配水，已经利用现有的蜂窝网络监控基础设施以及互联网门户网站最终用户进行数据传输和修改。这种做法已经持续了多年，没有已知的数据破坏事件。蜂窝网络是非常安全的，它的数据完全加密，使用成熟的加密标准，传输和网络数据传输前通过“http”的网站将更加安全。

RTU 和其他自动控制器设备在出现全行业互操作性标准之前正在开发。其结果是，开发人员和他们的管理创造了众多的控制协议。其中规模较大的厂商，也有动力去创造自己的协议以“锁定”自己的客户群。自动化协议列表在这里正在被编制。

最近，用于过程控制的 OLE（对象链接和嵌入）（OPC）已成为一个被广泛接受的解决方案，解决了不同的硬件和软件之间的互相通信问题，甚至使原本未预期的设备之间的通信成为工业网络的一部分。

4.3 自动化设备自身的消费

原则上说，对于一个在自动化系统中正确的评估，应考虑用设备本身的消费去估计总消费量（和最终相应的成本）。然而，不难想象设备的消耗相比引

入的节省的能量是非常低的，因此忽略它们而不产生一个重大的错误是可能的。

表 4.3 列出了自动化系统中所提出的设计解决方案所使用设备的最常见的消耗。

KNX 系统总线供给的是 30V 直流电压，设备的功率消耗在 30 ~ 540mW 之间。所以通常低功耗不显著影响总耗电量，在计算中可以忽略不计。

表 4.3 典型自动化设备的自身消耗（参考 KNX）

设备	自身消耗/mA
执行器 1 通道	5
执行器 4 通道	10
执行器 8 通道	15
执行器 12 通道	15
执行器对电动机的 1 通道	8
执行器对电动机的 2 通道	18
执行器对电动机的 8 通道	18
执行器的调光器	7
接触接口 4 通道	9
红外传感器	5
恒温器	5
计时恒温器	5
控制面板 ^①	2
触摸屏控制板 ^①	1
USB 接口	5

①：控制面板和触摸屏控制面板直接由主输电线供电，它们的耗电量就是总线系统失去的总电量。

4.4 基本计划

本节将介绍自动化功能在合理利用能源上的作用。为方便参考，根据操作系统来将功能进行划分。

4.4.1 加热和冷却

4.4.1.1 自动恒温控制阀或电子调节器控制每个房间

如图 4.7 所示，在每间客房中有一个控制器（R），它不与其他环境协调。该

器件还没有连接到总线上，但它有一个输出电流控制的传热流体的排出阀。另外，恒温器可以被用作环境的恒温阀。

1. 类别

排放控制。

2. 原理

在每个单独的区域中的温度可以调节，但在控制器之间没有通信。

3. 主要成分

- 1) 独立的恒温器或电子控制器；
- 2) 恒温阀。

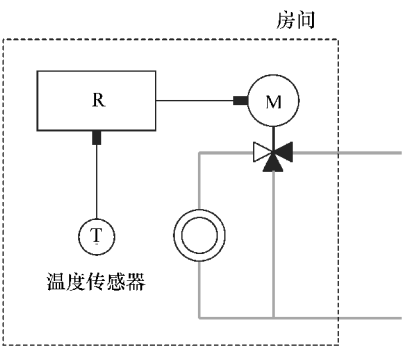


图 4.7 通过恒温控制阀或电子调节器来自动控制每个房间的温度

4.4.1.2 取决于外界温度的带有补偿温度的水温控制

如图 4.8 所示，该调节器（R）将信号发送到热发生器，其中的流体温度是根据外界温度变化而变化的。温度传感器检测流体流动的温度（T2）和外部的流动温度（T1）。没有房间温度传感器，也没有和外部热副系统总线的通信。

1. 类别

在配电系统中水温的控制（供应和返回）。

2. 原理

热传送网络的温度根据外部的温度补偿来进行调整。对于热的计算，需要对流动温度设定点值，以获得在区域内的平均温度。

3. 主要部件

电子控制器：

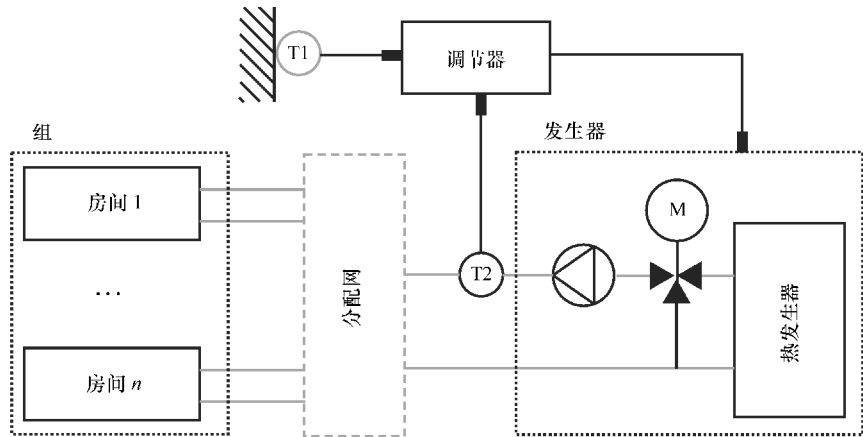


图 4.8 取决于外界温度的带有补偿温度的水温控制

- 1) 外部温度传感器；
- 2) 温度补偿传感器。

4.4.1.3 开/关控制分配系

如图 4.9 所示，分配泵上的开/关控制是根据该区域恒温器上设定的温度进行的，以激活或停止传热流体的流动。在紧凑的锅炉中，泵分布通常是建立在紧凑锅炉的内部，且没有与外部热副总线之间的通信。

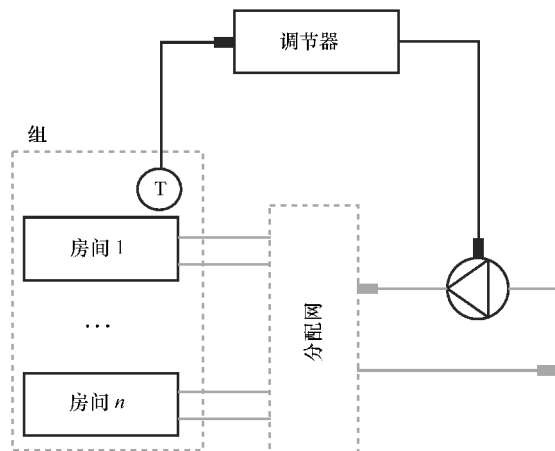


图 4.9 分配泵的开/关控制

1. 种类

分配泵控制。

2. 原理

当温度超过设定点时，控制器（R）使分配泵停止工作。当温度低于设定点时，再次起动操作。

3. 主要部件

调节器或恒温器。

4.4.1.4 自动控制的定时功能

如图 4.10 所示，这种恒温器在所有环境中都可以使用，可以通过传感器测量温度并且可以根据时间和温度设定点控制发生器操作。导热流体的循环是从指令开始的，例如在恒温器所设定的时间内，区域的温度低于规定值，（PG）泵和分布阀（VG）将会起动。没有预期的与外总线热子系统之间的通信。

1. 种类

产生和/或分布和间歇性的时钟。

2. 原理

控制系统根据环境中的人工预先在环境控制器中设定好的温度和时间上进行操

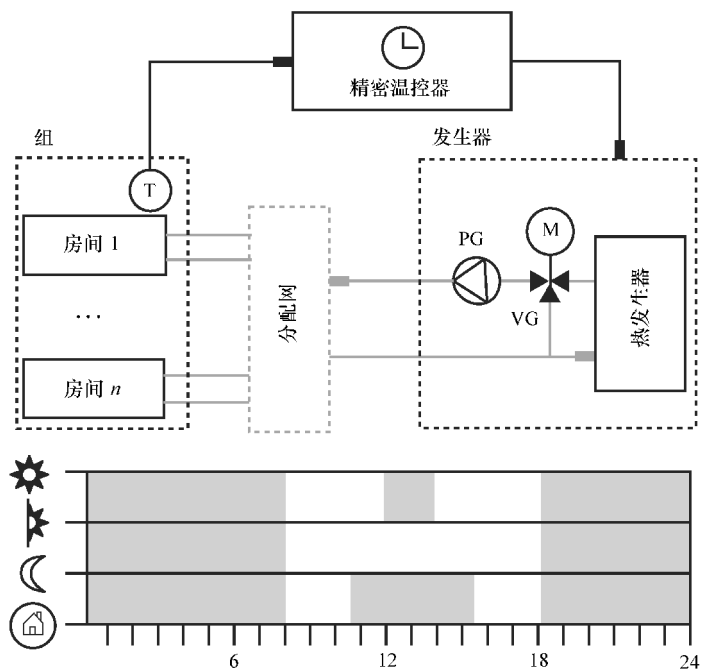


图 4.10 自动控制的定时功能图

作，但是没有考虑热负荷的变化和实际占有率。

3. 主要部件

恒温器和电子控制器。

4.4.1.5 部分互锁（依据高压交流系统）

加热和冷却系统之间的互锁装置包括一个当外界温度低于加热设定点（如 20℃）时就激活加热系统的控制器（RC），以及一个当外界温度高于冷却设定点（如 24℃）以上就激活冷却系统的控制器（RF）。传感器信号 TE 可以根据外部温度改变中性区的宽度。

该方案依赖于所使用的系统的类型。

1. 种类

加热和冷却在其输出端和/或分布水平互锁。

2. 原理

两种传热流体的流动温度都可以由外界温度所影响，以降低在夏季加热和冬季制冷的可能性。为了降低同时加热和冷却的可能性，控制系统在温度可变的导热介质和冷热中和器（中和区）之间提供一个大的间隔来实现。

3. 主要部件

1) 暖气流量调节器；

2) 冷却流量调节器;

3) 室外温度传感器。

4.4.1.6 每一个房间自动控制功能与监管机构和系统总线之间的通信

如图 4.11 所示, 每一个房间的温度都可以由别的房间带有监控器的恒温器来调节。

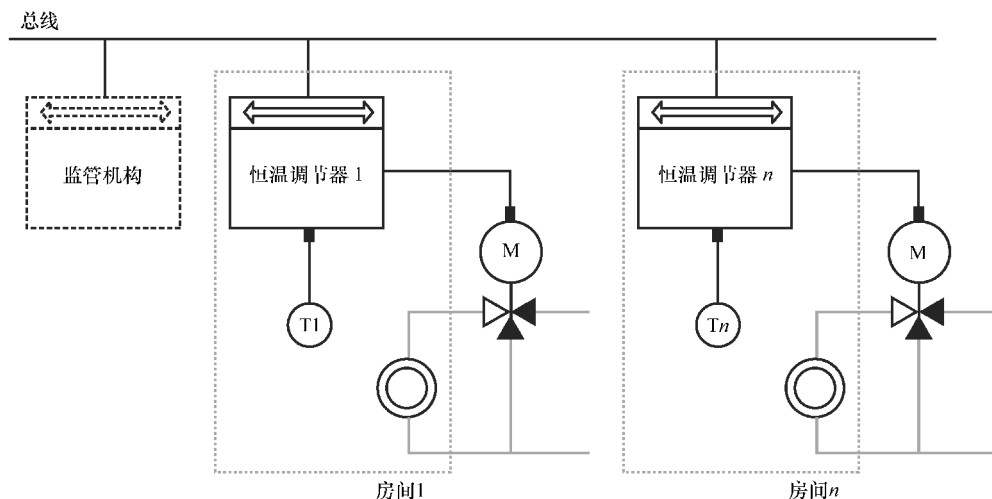


图 4.11 每一个房间的自动控制功能与监管机构和系统总线之间的通信

1. 种类

排放控制。

2. 原理

恒温器通过集成温度传感器或者远程混合阀来调节导热流体的流动。这项功能允许在不同环境和不同中央控制器下对温度进行调节。

3. 主要部件

1) 恒温器;

2) 混合电磁阀 (或拦截);

3) 可能的中央监管机构。

4.4.1.7 内部温度控制

如图 4.12 所示, 在任何环境下, 温度由一个电子调节器来调节, 这个调节器分别作用在相应的阀和泵上。在任何环境中的传热流体的温度都被连续地修改和优化, 这种修改和优化取决于外界温度和设定的温度。网络中导体温度的调整可以通过输出与回流的混合来实现, 或者直接操作燃烧器来实现。

1. 种类

在配电系统中的水温控制 (输出与回流)。

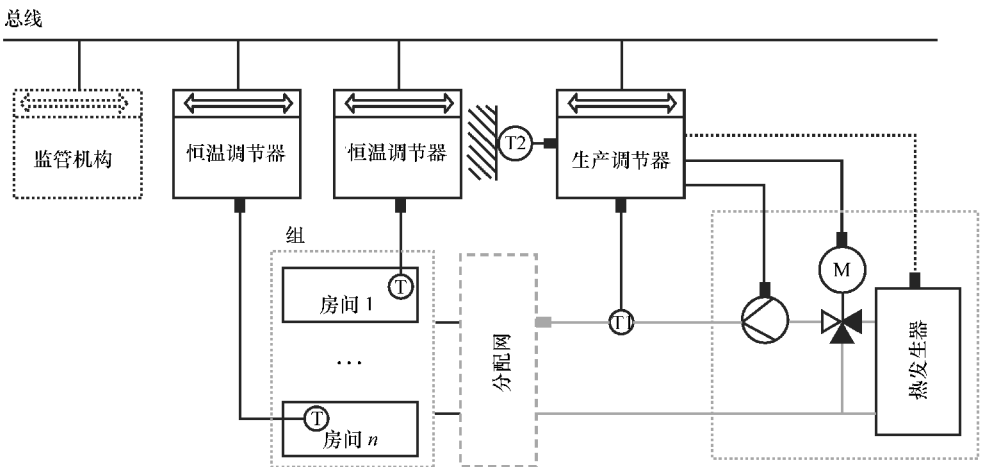


图 4.12 内部温度控制

2. 原理

生产调节器（RG）通过调节混合阀，或直接控制燃烧器来调节流动水的温度。这种调节是通过测量每个房间温度的恒温器来实现的，其中 T2 传感器检测外部温度，传感器 T1 检测的流体的流动温度，对于每个室外温度，包含一个预设号码，你会得到达到设定点的最低散热器热水温度。

3. 主要部件

- 1) 生产调节压器；
- 2) 在网络中的流体温度传感器（远程）；
- 3) 室外温度传感器；
- 4) 房间温控器。

4.4.1.8 在 ΔP 为常量的匀变速下控制分配系

如图 4.13 所示，泵中的变速驱动器可由一种开/关的方式控制，还可以调节热流加载量。在部分负荷的情况下，这可以减少电能消耗。

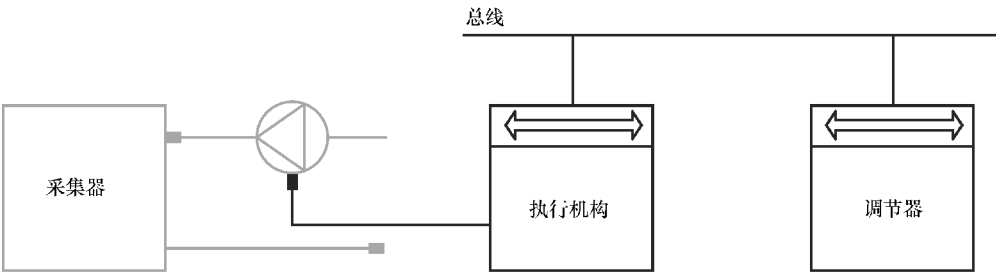


图 4.13 匀变速分配泵控制

1. 种类

分配泵的控制。

2. 原理

泵头内保持恒定，其调整范围（速度）与负荷成比例（打开或关闭一个或多个液压回路）。

3. 主要部件

- 1) 循环泵带有匀变速的变化和自我调节功能；
- 2) 调节器；
- 3) 执行机构（变频逆变器可以与泵或调节器相结合）。

4.4.1.9 带有最优化起动/停止的自动控制

如图 4.14 所示，激活是参照时期内最合适的时间，从而使要求的温度在设定的开始时间达到。开始时间的设置取决于控制系统的类型，如在控制类型（锅炉、流动温度）和建造类型（接地、隔离等）上的终端类型（风机盘管、散热器、地板、辐射吊顶等）。

用最优化的停止时间来预计工厂的关闭时间，以使在规定的温度期间结束时舒适环境的温度是不低于一定值。

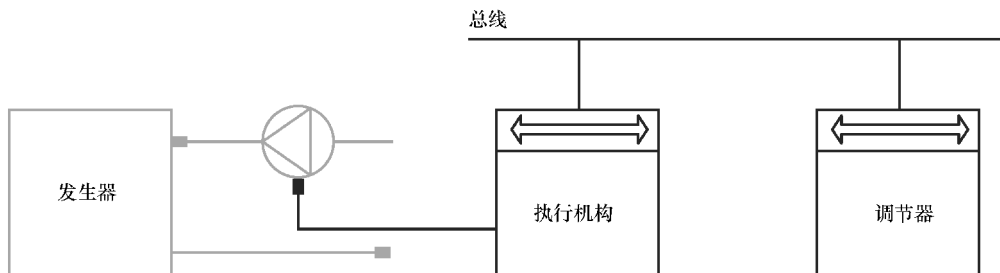


图 4.14 最优起动/停止控制

1. 种类

产生和/或分配的间歇性控制。

2. 原理

起动和停止无需外部设备来实现，控制器软件在开始阶段使用输入的数据（如热惯量和方向的构造、终端的时间常数），在不牺牲舒适度的前提下以优化能源生产和分配。

3. 主要部件

- 1) 系统控制器；
- 2) 中央主管监测和/或管理系统。

4.4.1.10 在一定的管理要求下所有房间功能的综合控制

如图 4.15 所示，该功能检测每个房间的温度以使加热功能及时关闭，或者当

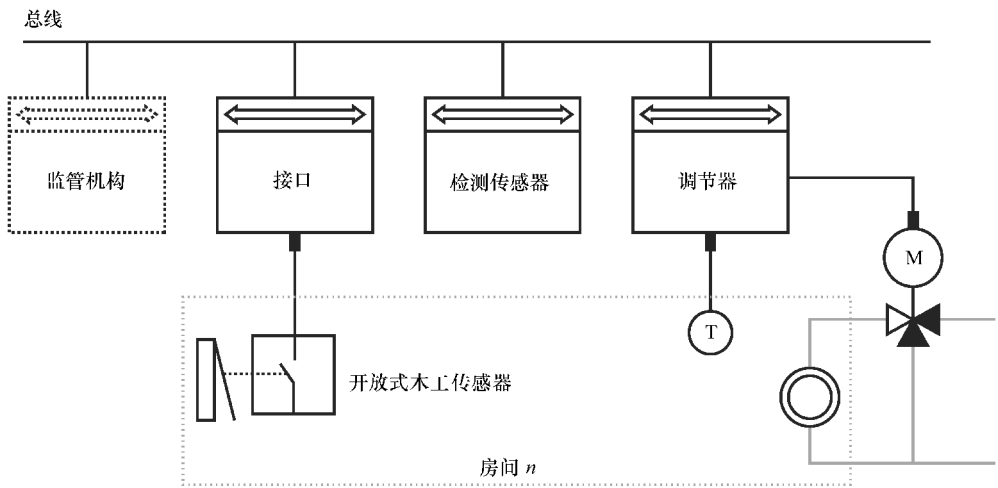


图 4.15 所有具有管理需求（占用率、空气质量等）的房间控制系统集成

房间没人或外门打开时置于低功率状态。这个控制器必须能和总线系统的其他控制器通信。

1. 种类

排放控制。

2. 原理

该调节器控制热水流量是通过控制开/关模式或者调制混合电磁阀来实现的。在占用传感器显示房间没有人或者传感器显示房间门打开了时加热器可以被中断或者处于一种预设状态。控制器和设备例如占用传感器和二进制界面，在总线上发送本地控制的信息（如热负荷、占用、窗户/门状态等）。

3. 主要部件

- 1) 恒温器；
- 2) 运动传感器；
- 3) 环境温度传感器；
- 4) 门开传感器；
- 5) 接触界面；
- 6) 电磁开关/调节器。

4. 4. 1. 11 总互锁功能

由电气互锁控制的中央系统，防止制热和制冷的电动机同时起动：它可以通过外界温度来影响系统以提高舒适性以及更好地实施冷热转换。

该方案依赖于所使用的系统的类型。

1. 种类

间歇性控制的产生和/或分配。

2. 原理

加热、制冷之间的互锁确保了在环境中，加热、制冷电动机不会在一个区域同时起动。这取决于所使用的电动机的类型，以及在传热流体上的分布和控制（在中央或在个别区域）。

3. 主要部件

- 1) 用于加热的流量调节器；
- 2) 用于制冷的流量调节器；
- 3) 外部温度传感器。

4.4.2 通风及空气调节

4.4.2.1 时间控制

如图 4.16 所示，一个程序控制着注射液和排风扇（V1 和 V2）在设定时间内的开/关转换。室内空气流动由风扇 V1 和/或 V2 控制，并且被设定为最大负荷。为了节能，当电扇起动时，空气调节器 AHU（空气处理机组）的热发电机应该关闭。

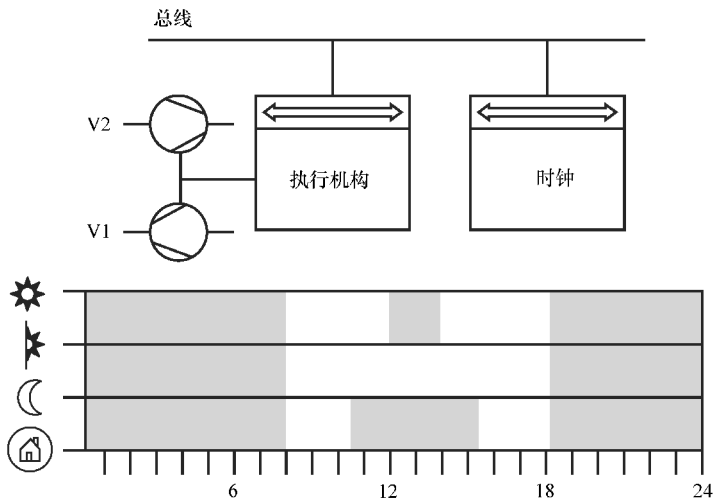


图 4.16 时间控制

1. 种类

环境中空气流量的控制。

2. 原理

该系统在集中规划下工作，根据一个预定的时间程序，控制空气流量。

3. 主要部件

- 1) 系统时钟；
- 2) 执行器机构。

4.4.2.2 时间开/关控制

如图 4.17 所示，一个程序通过调节器在固定的时间控制进气扇和排气扇（V1 和 V2）的开关转换，室内空气流量由风扇 V1 和/或 V2 控制，并且被设置为最大负荷。为了节约能量，当电扇关闭时应该关闭 AHU 室内空气控制器的发动装置，同时向 AHU 控制器的执行机构发送一个特殊信号。

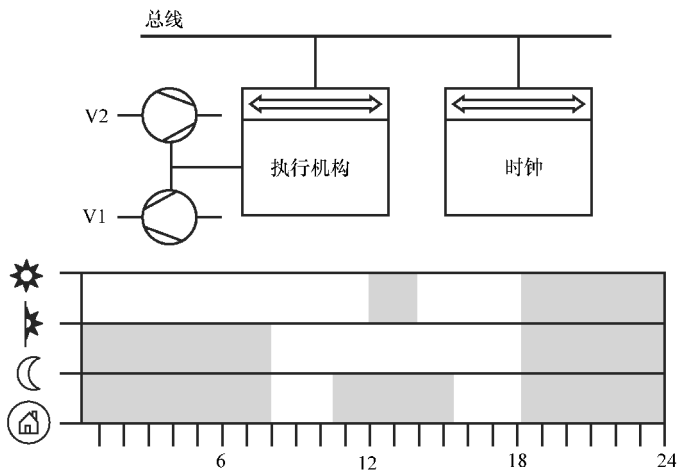


图 4.17 时间开/关控制

1. 种类

空气流量控制的 AHU。

2. 原理

在一个房间作为参考的这项功能影响了当地每一个房间的空气流动。根据时间表，在占用期间空气处理系统提供的流量为最大负荷。

3. 主要部件

- 1) 系统时钟；
- 2) 执行器。

4.4.2.3 除霜控制与热回收

在冬季，由于湿度和外部温度，在热量回收的过程中会形成冰。因此必须增大排气扇的功率以确保空间中有适量的新鲜气流。通过循环除霜控制，避免了能源的消费量增加，如图 4.18 所示。

1. 种类

回收热量的除霜控制。

2. 原理

外部线圈上的冰的形成决定了自动启动除霜周期，通常持续 3~5min。AHU 持续向内部空间提供所需热量的 50%，而不增加能耗。外部温度传感器及其接口激

活除霜周期，并控制排气风扇（V2）。

3. 主要部件

- 1) 执行器的返回风扇；
- 2) 室外温度传感器（可被合并）。

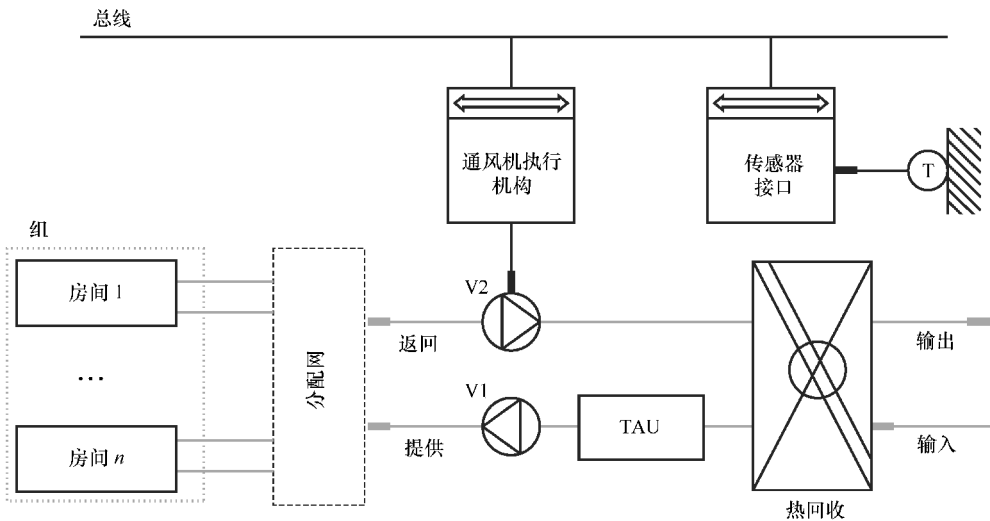


图 4.18 除霜控制与热回收

4.4.2.4 恢复操作的控制功能

恢复操作可能会适得其反，所以它应该被停止或排出流动管道。
该方案依赖于所使用的系统的类型。

1. 种类

控制功能的恢复操作。

2. 原理

当机器和温度条件允许的情况下，热回收将自动启动。

3. 主要部件

热回收器的制造商通常会提供温度传感器（放在适当位置）和相关制动器来防止机器过热。这种情况可能会降低或不会进行在炎热的天气中的恢复操作。控制组件高度依赖于它们的类型（如横流式热回收、热交换器、纺纱质量等）和依赖于使用过的建造机器，所以温度控制由机器的供应商所要求。

4.4.2.5 夜间制冷

如图 4.19 所示，通过时钟系统，夜间冷却的时间被确立。界面传感器检测室温（T1）和室外气温（T2）。

在以下条件下控制器工作：

- 1) T1 室温高于一个固定值的 SP1：T1 > SP1。

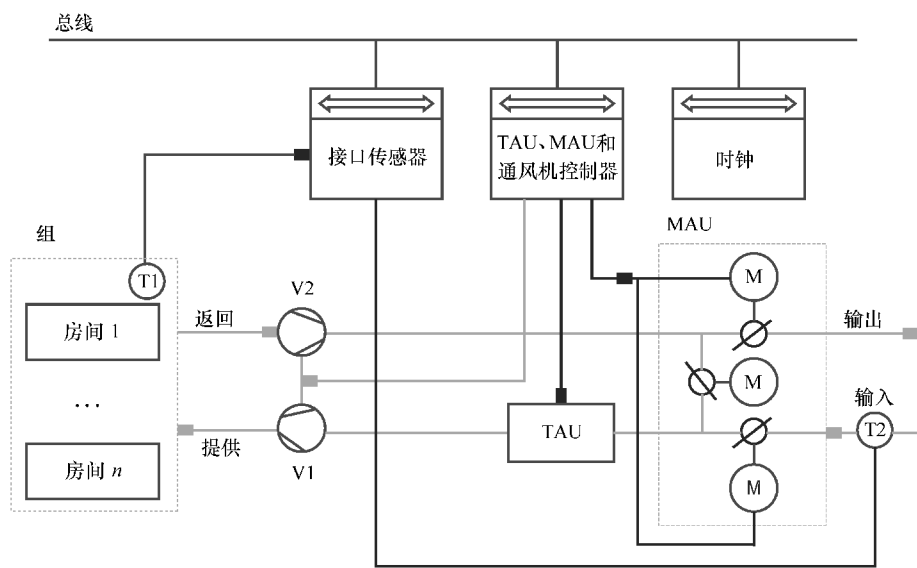


图 4.19 夜间制冷

- 2) T2 外界温度低于一个固定值 SP2: $T2 < SP2$ 。
- 3) 室内和室外的温差超过一个固定值 SP3: $(T1 - T2) > SP3$ 。
- 4) 停用 AHU。
- 5) 打开进入/释放快门和室外空气并关闭再循环风门。
- 6) 激活强制通风（V1 和 V2）。

1. 种类

自然冷却。

2. 原理

加热制冷线圈被禁用，但允许使用夜间通风，尤其是在春天和秋天，外面的空气会在夜间对房屋进行预冷。在这种方式中，由于建筑物的热惯性冷却会减慢，制冷变得更快、更便宜，并且空调省的电能可以在第二天保存下来。

3. 主要部件

- 1) 阻尼控制器（UMA）；
- 2) 风扇控制器；
- 3) AHU 控制器；
- 4) 通过编程设定的系统时钟（昼夜）；
- 5) 接口温度传感器。

4.4.2.6 固定设定点控制

如图 4.20 所示，流动温度是手动设置在 AHU 控制器上的，而接口的温度传感器测得的温度值发送到 AHU。设定值的偏差被 AHU 逐步清除并逐渐调控制冷或制

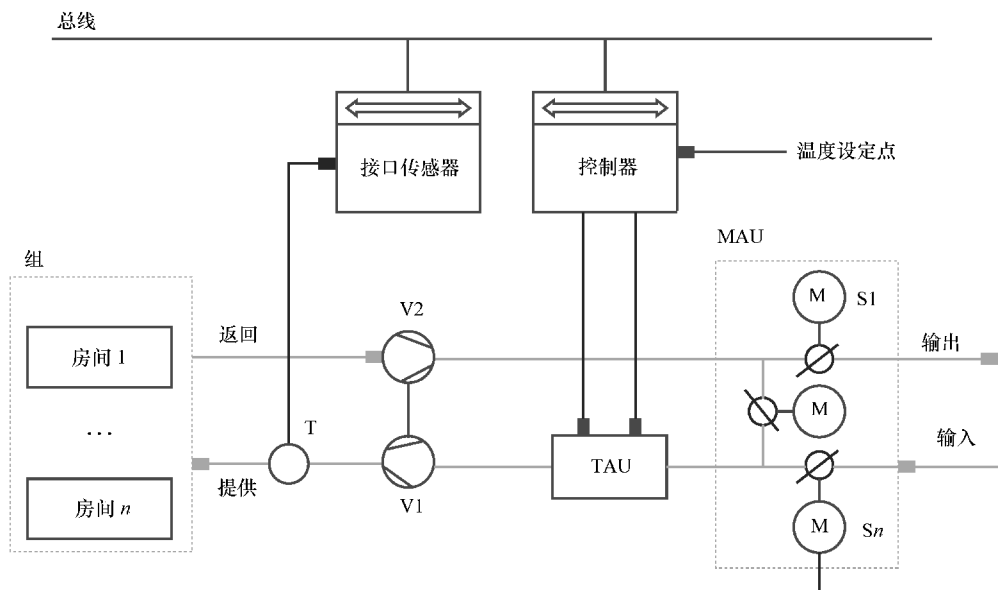


图 4.20 固定设定点控制

热线圈。

1. 种类

流动温度控制。

2. 原理

给所有房屋提供的流动温度是手动设置在 AHU 的最大负荷水平（设定点温度）的。设定点是恒定的，但是如果需要，它可以手动调整。这是对加热和冷却都可以实现的。

3. 主要部件

- 1) 接口温度传感器；
- 2) AHU 控制器。

4.4.2.7 流动空气的湿度限制

如图 4.21 所示，恒湿器根据进入空气的流量来设定最大相对湿度，无论是连续地还是间歇地，AHU 的加湿器都可以使相对流量湿度保持在低于设定的阈值限制。由于空气加湿时会使温度冷却，所以当 TAU 打开时，有必要通过 T 传感器来控制温度加热。

1. 原理

在小系统中，通过一个湿度调节器来控制湿度。每当湿度低于设定值时，控制湿度调节器使之关闭。

这是一个典型的开/关控制加湿系统。

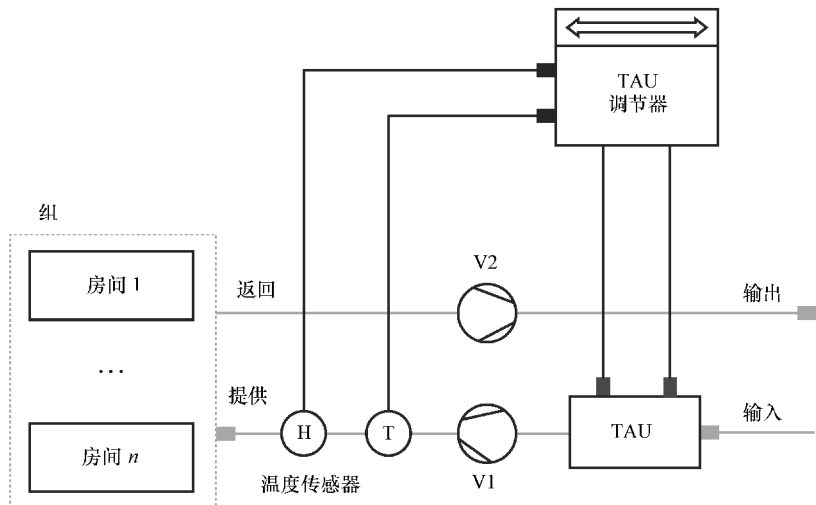


图 4.21 流动空气的湿度限制

2. 主要部件

- 1) 湿度调节器；
- 2) 温度传感器；
- 3) AHU 稳压器。

4.4.2.8 压力或流量的自动控制

如图 4.22 所示，百叶窗的通道 S1、Sn 打开或关闭时，在一般的流动管道中携

总线

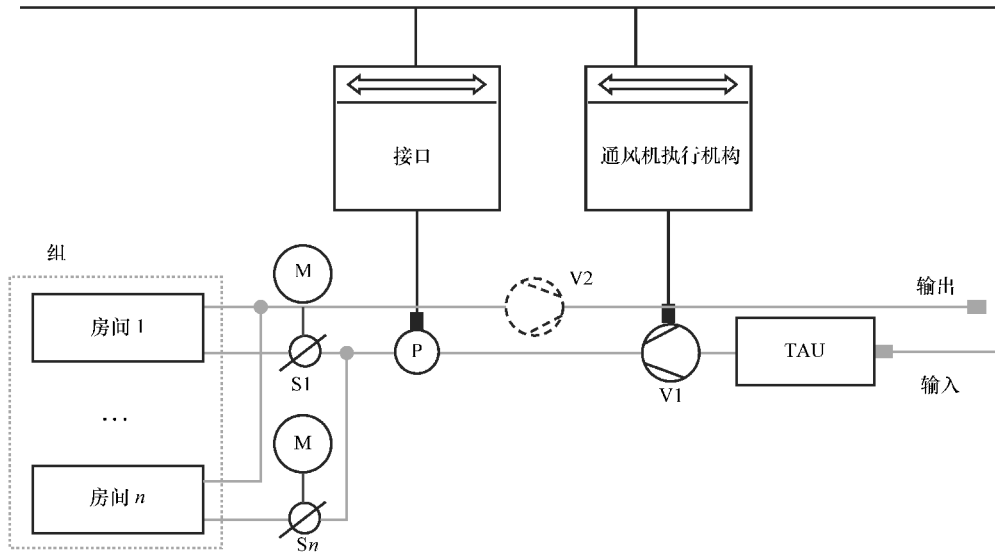


图 4.22 压力或流量自动控制

带不断变化的空气流量。压力传感器 P 检测到压力差的变量值（例如导管和周围的空间之间的压力差）。风扇执行器在通道中调整空气压力到设定值，以补偿阻尼器的状态发生改变而导致的压力变化。预定的压力值的差可以被视为阻尼器的数量：根据百叶窗超过总数的数值来改变规定值以达到恰当补偿的目的。

1. 原理

每间房间中经过处理的流动空气和负荷的需求相匹配（全部或部分的用户/连接的空间）。在这种方式中，在部分负荷的状态下，该单元的处理空气风扇耗能减少。

2. 种类

AHU 流量控制器。

3. 主要部件

- 1) 风扇执行器；
- 2) 压力传感器接口。

4. 4. 2. 9 自然冷却

如图 4. 23 所示，当外面的天气条件允许的情况下，逐步调整室外空气阻尼器（S1），排出（S2）而再循环（S3）空气与室内、外空气混合（循环）来冷却环境。TAU 控制器控制加热和冷却线圈使房间内的温度维持在需要的范围内。请注意，如果没有 AHU 的干预，有电器、太阳辐射、人等存在下，室内空气条件和外界空气条件相适应，所以始终有点热。

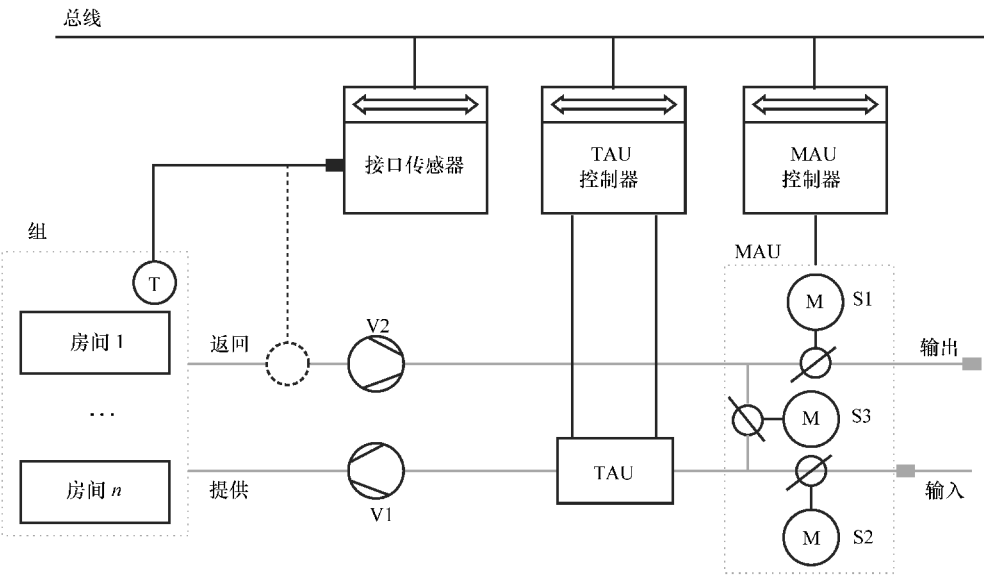


图 4. 23 自然冷却

当 CT 传感器检测到室温增加，却还没有达到激活冷却线圈的温度，UMA 控制风门使外部空气（低于内部）和循环空气相混合。以这种方式，仅通过测量室温就能达到自然冷却的目的。除了传感器 T，也可以使用测量回流空气的温度传感器（见图 4.23 中的虚线）。

1. 种类

自然机械冷却。

2. 原理

在春、秋两季，室内温度控制器可以进行校准，以补偿大量外部空气带来多余的热量，达到自然冷却。当一年中有几个月室外温度范围在 10 ~ 20℃ 时，这项措施是重要的节能保证。可以更新空间空气，而不使用 AHU 和热回收，但需要在外部温度低于室内温度的情况下。

3. 主要部件

- 1) UMA 执行器；
- 2) AHU/UMA 控制器；
- 3) 接口温度传感器。

4.4.2.10 设定点外部温度依赖性

如图 4.24 所示，对流动温度的控制受到外界温度的影响（气候补偿）。补偿功能被存储在 TAU 控制器中，调节制冷、制热线圈的活力。此功能允许根据室外温度变化范围调节冬季、夏季温度供应。

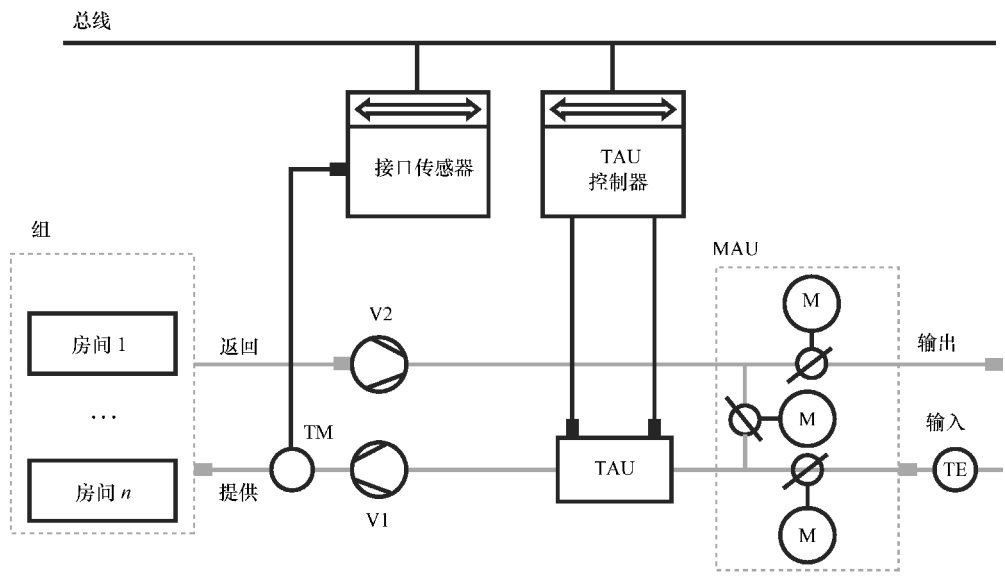


图 4.24 设定点外部温度依赖性

1. 种类

流量温度控制。

2. 原理

供给温度的设定点是为不同区域总的连续负荷设定的。根据单独房间可能出现的要求，流动温度可以以一个简单的外部温度的函数关系（如线性）为基础进行调节，而总的系统不允许根据一个房间的要求进行温度调整。

3. 主要部件

- 1) 接口温度传感器；
- 2) AHU 控制器。

4. 4. 2. 11 流动空气湿度控制功能

如图 4.25 所示，控制器将流动空气的相对湿度调整到所有房间都恒定的特殊值。通过使用 AHU 所有部分的行为序列调整器使控制器运转以使湿度达到预设值：冷却、冷凝、加湿和加热的顺序会导致空气湿度含量的绝对和/或相对变化。为了获得高效的调整（如同时加热和冷却），重要的是设定有最大死区的设定点控制器。

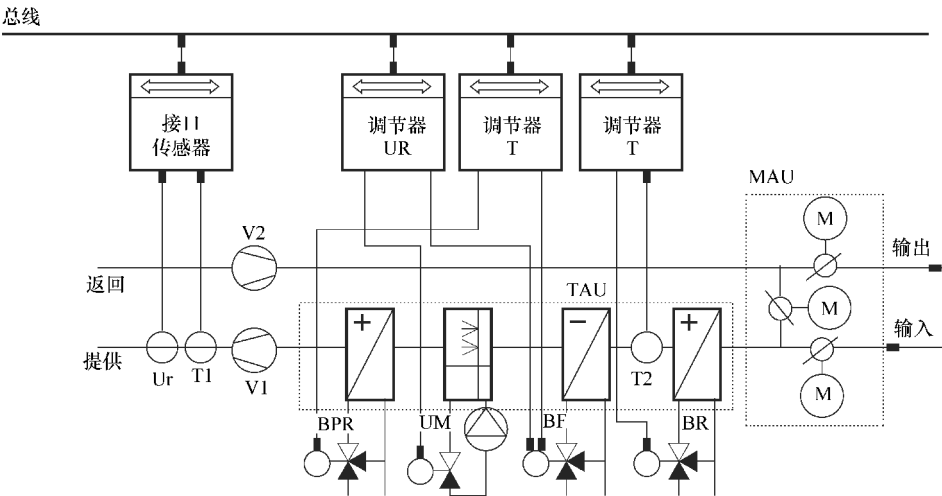


图 4.25 流动空气湿度控制功能

1. 种类

湿度控制。

2. 原理

在温度 T1、湿度 Ur 的条件下，设定点设置在了温度、湿度调节器和界面传感器，该系统控制装置 BF、UM 和 BPR 的冷却或加热、加湿或除湿，以维持相对湿度和流动空气温度在设定值。相对湿度被流动管中的 Ur 传感器检测到。在湿度检

测时，通过传感器 T1 来测量流动温度也是很必要的。除湿通过制冷线圈（BF）来实现，其接收温度、湿度控制器发出的命令（通过软件来切换当前调整器的优先权，给予最大的冷却能力命令以最优权）。该温度控制器根据接收自温度传感器 T1 的信号控制制冷（BF）和制热（BPR）线圈。预热线圈 BC 不直接参与控制湿度，但它保护线圈在寒冷的冬季不会冻结且确保一个最低温度（12 ~ 16℃），由传感器 T2 检测到并由连接到它的控制器控制，以保证该系统最佳运作。

3. 主要部件

- 1) 空气相对湿度调节器；
- 2) 温度调节器（T1 和 T2）；
- 3) 接口传感器 T/Ur；
- 4) 流动空气的湿度控制（湿度控制）。

4. 4. 2. 12 占用控制功能

如图 4. 26 所示，当有人在时，占用传感器使空气流动并在该空间通过空气供应执行机构激活循环用风扇 V1 和/或 V2。为了节约能源，当风扇不运行时，应该关闭空调机组。

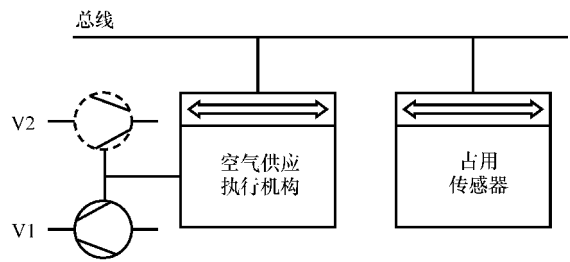


图 4. 26 占用控制功能

1. 种类

空间流动空气控制。

2. 原理

该系统控制供给空气的流量，根据环境/区域中人的多少，设定最大负荷。这种方式的能量损失是最小的，能量只在实际工作期间，在部分负荷上损耗。

3. 主要部件

- 1) 空气供应执行机构；
- 2) 占用传感器；
- 3) AHU 控制器。

4. 4. 2. 13 负荷相关的功能设定值

如图 4. 27 所示，该系统能够降低热和冷的产生，这是严格必要的，以避免在生产 and 分配中有所损失。AHU 控制器收集的负荷数据（如空间温度的值）是来自

所有地区/区域的，并根据加热制冷次序来优化流动温度 T_m 的值。

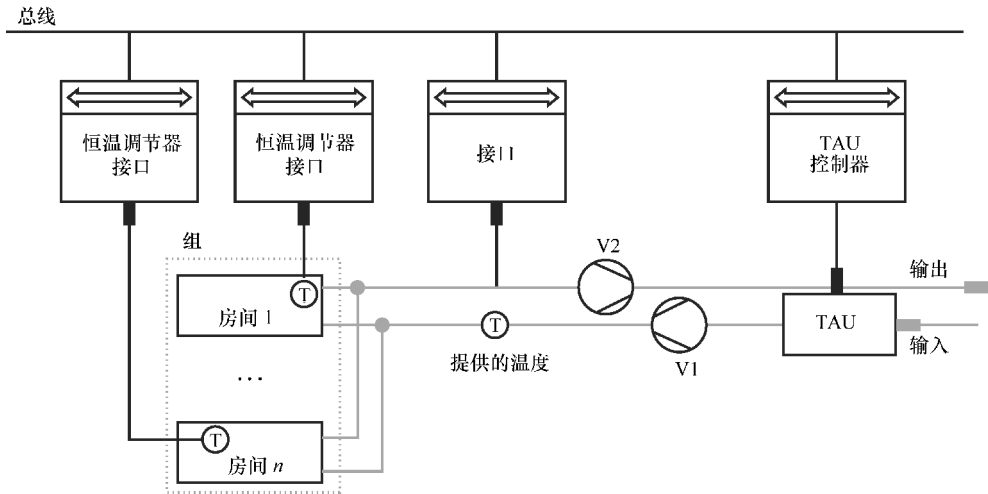


图 4.27 负荷相关的功能设定值

1. 原理

流动温度设定点是一种在不同房间的有源负荷功能：系统基于房间内的温度和/或空气条件集中收集数据以设定流动温度以达到调整的目的。

2. 种类

流量温度控制。

3. 主要部件

- 1) 接口温度传感器；
- 2) AHU 控制器。

4.4.3 照明

4.4.3.1 手动和自动停机切换功能

如图 4.28 所示，产生一个信号导致自动关机，每天至少一次，通常是在晚上，以抑制不必要的夜间作业，避免不必要的能源消耗。当关闭开关这个警告给用户发出时，灯光将会逐渐熄灭。

1. 种类

占用控制。

2. 原理

照明切换由作用于连接到输入装置的功率指令来引发。关机往往是手动的，但是也可以在预设的时间后自动关机。照明电源的开启和关闭可以由一个或多个立即关闭和延时开启的控制点手动控制。

3. 主要部件

- 1) 手动控制照明输入端的总线接口；

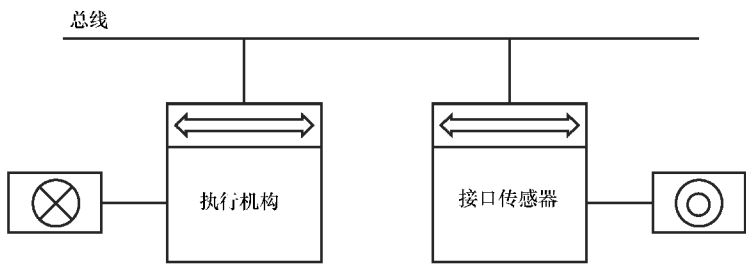


图 4.28 自动和手动停机切换功能

2) 照明控制执行器。

4.4.3.2 手动电气控制和自动打开/减小/关闭的占用检测

如图 4.29 所示，占用传感器或手动控制器通过执行器来控制照明。然后，当传感器不再检测到信号存在时，照明自动降低到一定的百分比和/或关闭。

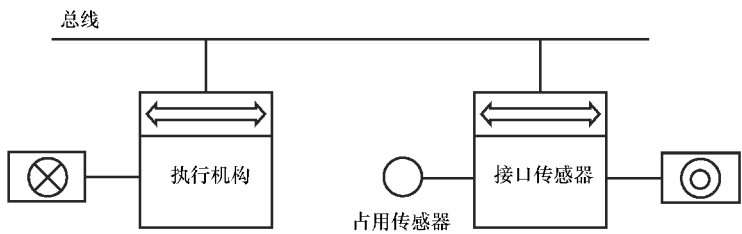


图 4.29 手动电气控制和自动打开/减小/关闭的占用检测

1. 种类

占用控制。

2. 原理

照明系统可以通过安装在需照明区域的命令手动打开。如果用户不手动关闭照明系统，系统会自动在一个特定时间内把照明保持在一个节能状态（不超过 20%），在受控环境里的上一次检测信号存在之后（如 3min）。如果在另一个给定的时间内环境中没有检测到信号，照明系统将会彻底关闭。

3. 主要部件

- 1) 占用传感器；
- 2) 执行器。

4.4.3.3 电动控制的自动化传动遮光控制系统

如图 4.30 所示，百叶窗控制器根据由照明传感器检测到的环境光通过执行机构器调整百叶窗位置。

1. 种类

占用控制。

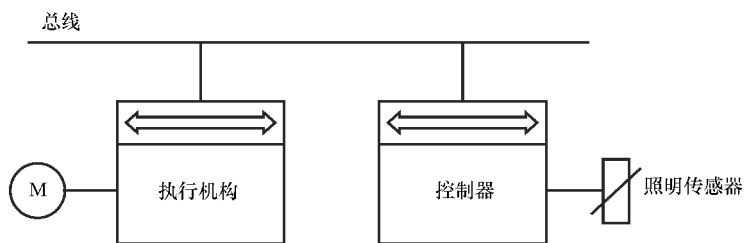


图 4.30 电动控制的自动化传动遮光控制系统

2. 原理

日光控制可以在冬季节能和在夏季防止眩光和过热。控制百叶窗可以减少热量流动在夜间的损失。

3. 主要部件

- 1) 环境照明传感器；
- 2) 窗帘/百叶窗控制器（夏季/冬季）；
- 3) 执行机构。

4.4.3.4 自动日光控制功能

如图 4.31 所示，根据人类的存在与否和周围环境的光线，占用传感器通过执行机构控制照明系统的功率。

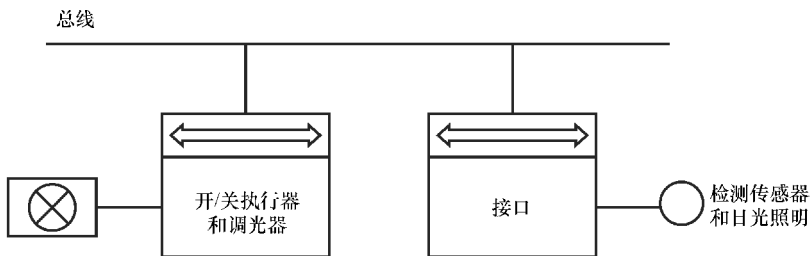


图 4.31 自动日光控制功能

1. 种类

日光控制。

2. 原理

该系统根据来自外部的光强在给定的区域内调整灯的亮度。

3. 主要部件

- 1) 占用率及日光传感器；
- 2) 开/关执行机构和调光器。

4.4.4 遮光系统

4.4.4.1 控制灯光/百叶窗/HVAC 功能

在冬季，免费的太阳能控制可以节省能源。在夏季提供保护防止眩光和过热。通过控制百叶窗，可以减少热流动在夜间造成损失，如图 4.32 所示。

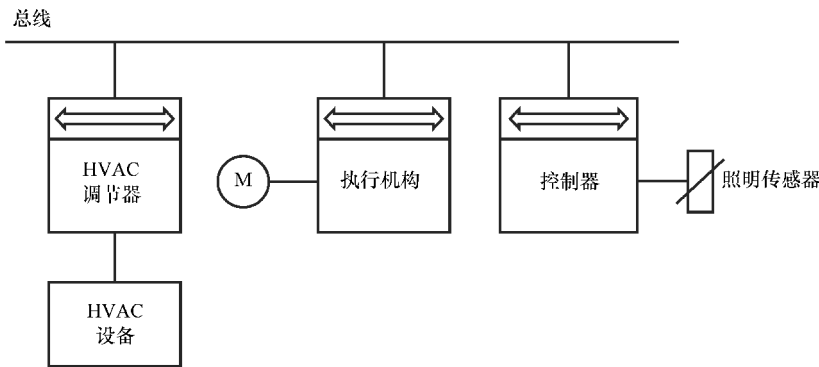


图 4.32 控制灯光/百叶窗/HVAC 功能

1. 原理

根据传感器（环境照明传感器）测量到的环境光，控制器通过驱动器来调整百叶窗的位置。根据传感器传来的数据，控制器调节 HVAC 系统的操作。

2. 类别

遮光控制。

3. 主要部件

- 1) 环境照明传感器；
- 2) 百叶窗驱动器；
- 3) 窗帘/百叶窗控制器（夏季/冬季）；
- 4) HVAC 控制器。

4.4.5 建筑技术管理

4.4.5.1 集中控制功能

如图 4.33 所示，该系统可以很好地满足用户的需求，并提供以下功能：

- 1) 集中设置时间程序和设定点。
- 2) 系统的集中优化。
- 3) 定期对加热、冷却、通风、照明进行设定，并且它们的设定点要准备随时使用和满足实际需求。
- 4) 设定执行器的操作参数。
- 5) 对区域内的控制器进行定期评估，它们的设置点通常由用户修改。集中式系统可以检测并纠正因用户错误操作或误解而造成的页面设置错误。

6) 互锁控制（发射和分布）之间的对抗和冷却：它仅仅是局部的，因为它的设定点必须定期更换，以尽量减少同时使用加热和冷却。

7) 报警/故障检测和监督的功能是适和用户需要的，并且不同的控制器要最优化设置。一定要通过简单的指令来检测异常操作（报警）并通过简单的方式记录和显示结果。

8) 能源管理计划的实施是建立在房间内有没有人的基础上的。

9) 自动化控制中的自动启动是基于占用参数和影响能源消耗参数的变化的。

1. 类别

民政系统或楼宇自动化控制计划。

2. 原理

它允许系统控制和管理更集中化。

3. 主要部件

- 1) 触摸屏；
- 2) PC；
- 3) 智能手机等。

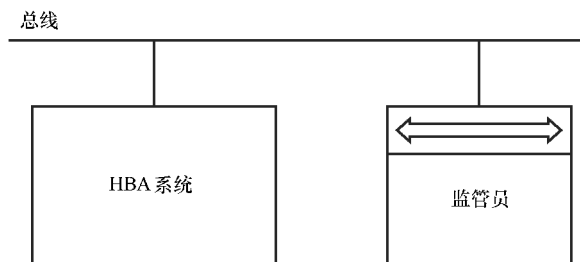


图 4.33 集中控制功能

4.4.6 建筑内的技术安装

4.4.6.1 故障检测、诊断和提供技术支持的功能

如图 4.34 所示，TBM（技术建筑管理）系统增加了集中自动控制的功能：

- 1) 设备诊断；
- 2) 设备状态；
- 3) 操作时间；
- 4) 故障类型；
- 5) 故障检测设备/执行器/传感器/控制元件；
- 6) 激活为系统提供定期维护和系统故障检测的技术支持的系统容量。

1. 类别

TBM 系统计划。

2. 原理

为了提高设备效率，系统能对设备效率提供定期诊断是十分重要的，检测它的操作参数，并识别故障。能将这些管理参数和技术支持连接起来是十分重要的，其频率取决于设备的复杂程度。

3. 主要部件

- 1) 触摸屏面板；
- 2) PC；
- 3) 智能手机等。

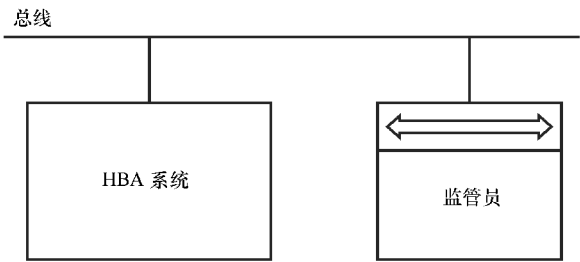


图 4.34 错误检测、诊断和提供技术支持的功能

4.4.6.2 对能源的使用、内部条件及机器改善可能性的报告功能

如图 4.35 所示，对于一个真实的光管理系统，为了检测其效率，系统将能源消耗参数和操作条件显示出来是必需的，这可确保连续的高能源利用率和在之后进行干预的能力以使系统可以适应住房需要和环境的改变。

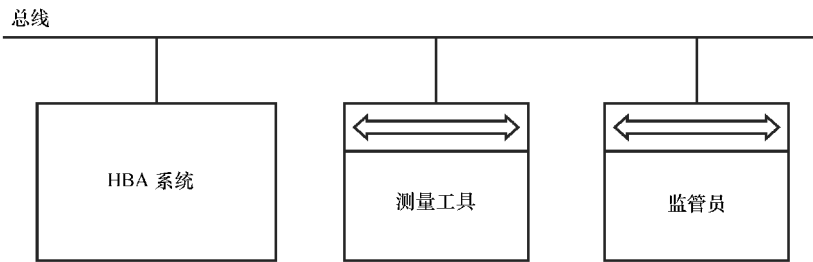


图 4.35 对能源的使用、内部条件及机器改善可能性的报告功能

1. 类别

TBM 系统计划。

2. 原理

一份能源消耗状态和室内条件（采暖、制冷、照明等）的报告一定要准备好。这份报告可以涵盖以下内容：

- 1) 建筑节能证书；
- 2) 评估能源和建筑系统的改进；
- 3) 一个检测功能；

- 4) 能量检测;
- 5) 监测房间的温度和内部的空气质量;
- 6) 监测系统的功率消耗。

3. 主要部件

- 1) 能源消耗的测量 (软件和硬件);
- 2) PC 上的软件。

4.5 建筑节能性能评估

处理综合管理带来的影响就节约能源和实现建筑多样化功能而言仍十分困难,这意味着到现在为止自动化仍不被视为一种有效地组成部分以实现官方机构设定的节能目标。即使尚未完全成熟,但是笔者认为,可以实现欧洲标准 EN 15232 建筑物的节能性能。建筑物自动化效果、控制和技术管理通过允许开发自动化应用的潜能以合理利用资源,这对现实情况可能会作出重要的贡献。

标准文件使工具和统计数据可以公共使用,这使设计师、公共管理员和终端用户可以快速地引进基本战略选择以实现良好的技术和经济上的平衡和实现建筑过程中成本和建筑第一消耗之间的环境平衡。提供的数据显示,根据居住或工作环境中的存在或不存在人来自动调整照明或加热和冷却,它具有以下优点:

- 1) 无论任何自动化水平,在不影响舒适性和安全性的前提下,与传统系统的能源消耗相比,自动化能节约更多的能源。

- 2) 通过委派甚至十分简单的自动化任务,例如可以由人来做的相关不必要的照明,就可以导致有形的、可衡量的能量节约。使用传统和正式承认的设备,如标准 EN 15232,可以帮助加速将建筑自动化节能列入法律文书的进程。

4.5.1 欧洲标准 EN 15232

在建筑中,当工作在室内环境中时,良好的能源管理是降低能耗、提高生活质量(舒适性)的基本和根本的因素。在减少消耗的常用工具中,限制自动化发展的实际因素是事前估计自动化带来的能源节约十分困难。为了得到一个正式的投资效益或是比较投资,结果的不确定性是至关重要的。

当采用一个更有效率的装置时,如热水器,事先量化利率是很容易的,但是一个系统的影响,如在楼宇自动化中,涉及一套技能水平和建模问题。

在这个方向上,作者认为,焦点是欧洲发布的标准 EN 15232 “建筑物节能性能,自动化的影响、控制和建筑技术管理”。大多数事先设置的标准都是楼宇自动化控制和管理系统估计能源消耗影响的问题。它允许基于采用更节能的执行元件,可以改善和优化标准部件的使用,具体的添加到一种传统方法中(保温隔热、发热,节能灯泡等)。此最终方法也可以被当前部件所采用,当然也可以和更好的部件结合使用。

标准 EN 15232 的主要创新特征可以概括如下：

- 1) 就建筑能量控制，这个标准将自动化技术传统地分成了 4 个等级；
- 2) 和建筑节能性能相关的自动化控制管理功能和同以上性能等级相关的列表；
- 3) 估计建筑节能性能的常规方法的定义。

4.5.1.1 自动化类的能源效率

从能源效率的角度来看，EN 15232 标准定义了 4 种常规类，符合自动化控制和管理系统的安装水平（见图 4.36）：

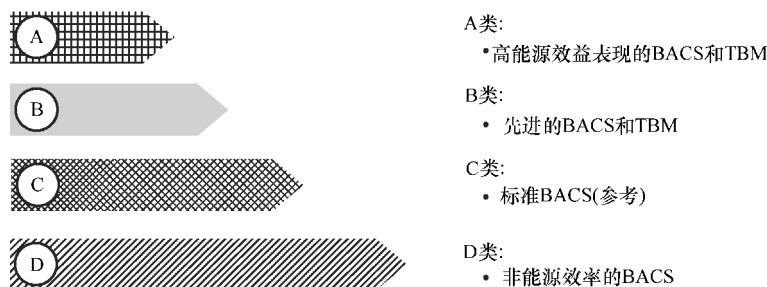


图 4.36 自动化、控制和管理系统分类的图形化表示

1) D 类“非能源效率的 BACS”：这包括传统和技术系统，没有自动化以提高能源效率。

2) C 类“标准”：这类与带有自动化系统、普通控制系统、被视为参考类的建筑相符合。

3) B 类“先进的”：这包括楼宇自动化和控制系统以及 TBM 楼内技术设施管理集中控制系统。

4) A 级“高能效率表现”：和 B 类类似，但具有更好的自动化控制，例如确保高能效益的系统。这种方法给出了一系列的通信优势：

① 它已经彻底被用户所熟知；

② 它总结了在一个单一的、重要的和简单的参数（类）条件下，性能导致复杂的系统很难被一般公众所理解。

每个类的定义是基于一系列没有经过详细介绍的自动化控制管理功能存在与否的。

4.5.1.2 自动化类的定义

标准 EN 15232 提供的工具是与建筑节能性能相关的所有的自动化、控制和管理功能，这些在前面能源效率的自动化类的列表中可以找到。

这些功能要求一个属于给定类的定义，对于住宅建筑和第三产业是不同的。C 类要求建造中自动化控制的最低功能。B 类要求特征函数的类加上一些额外的特定

功能，如房间控制器与楼宇中央控制的交流。A 类要求在 B 类的基础上添加一些 TMB 的特殊功能。可以注意到，虽然即使通过采纳方法[⊙]引入有些刻板，但是这些表对所有算数（包括建筑方面）都是有用的操作工具：

- 1) 业主、建筑师和建筑设计师/安装师对自动化功能的定义；
- 2) 政府机构有关自动化效率的最低要求的定义；
- 3) 政府机构和督察对评估和验证程序的定义；
- 4) 政府机构对验证程序计算和能源效率的定义；
- 5) 电气设计师和自动化程序员定义的硬件组成、软件和程序以验证系统的节能性能。

表 4.4 ~ 表 4.6 给出了加热控制、HVAC 系统和照明控制的例子。

表 4.4 考虑建筑能源性能的自动化、控制和管理功能定义实例：加热控制

自动化控制		类别的定义							
加热控制		住宅的				非住宅的			
排放控制		D	C	B	A	D	C	B	A
	安装在发射器或者屋子水平的控制系统，例如，示例1一个系统可以控制几个屋子								
0	没有自动化控制								
1	核心自动化控制								
2	单个屋子通过恒温阀或者电子控制器自动化控制								
3	单个屋子自动化控制，可以在管理者与BACS之间通信								
4	综合单个屋子的控制包括需求控制(有占用率、空气质量等)								
分布式网络控制热水温度(提供或者返回)									
	相同的功能可以应用在控制直流电加热网上								
0	没有自动化控制								
1	外部温度补偿控制								
2	内部温度控制								
分配泵的控制									
	控制泵可以安装在网络的不同层面								
0	没有控制								
1	开/关控制								
2	通过常量Dp控制变速泵								
3	通过比例量Dp控制变速泵								

⊙ 通过表 4.6 我们认为，例如某地下建筑要实现 A 类要求，但在此情况下显然白昼的自动控制的应用是没有意义的。

表 4.5 考虑建筑能源性能的自动化、控制和管理功能定义实例：HVAC 系统

自动化控制		类别的定义							
通风空调控制		住宅的				非住宅的			
在屋子水平的气流控制		D	C	B	A	D	C	B	A
0	没有自动化控制								
1	手控								
2	时间控制								
3	占用控制								
4	需求控制								
空气加湿器的气流控制									
0	没有自动化控制								
1	开/关时间控制								
2	自动流量或压力控制或无压力控制								
热交换…控制									
0	没有…控制								
1	有…控制								
热交换过热控制									
0	没有分布式控制								
1	没有过热控制								
自由机械冷却									
0	没有控制								
1	夜晚冷却								
2	自由冷却								
3	…定向控制								
供水温度控制									
0	没有控制								
1	容量的设定								
2	室外温度补偿可见设定								
3	负荷…补偿可见设定								
湿度控制									
0	没有控制								
1	供应空气湿度…								
2	供应空气湿度控制								
3	屋子或者…空气湿度控制								

表 4.6 考虑建筑能源性能的自动化、控制和管理功能定义实例：照明控制

自动化控制		类别的定义							
照明控制		住宅的				非住宅的			
占用控制		D	C	B	A	D	C	B	A
0	手动开/关转换								
1	手动开/关转换+附加的全面衰减信号								
2	自动检测自动开启/无效								
3	自动检测自动开启/自动关闭								
4	自动检测手动开启/无效								
5	自动检测手动开启/自动关闭								
日光控制									
0	手控								
1	自动								
百叶窗控制									
0	手动操作								
1	电动操作手动控制								
2	电动操作自动控制								
3	联合照明/封闭/HVAC控制(上述的)								

4.5.2 方法的比较

为量化评估效率和节能效能而定的 EN 15232 标准是通过自动化控制和管理系统在各种类型的新型的和现存的建筑中的应用引进来的，这项标准由大量的统计工作组成，并模拟了欧洲立法领域专家制定的 CEN/CENELEC[⊖]。

特别的，EN 15232 标准提供了两种不同的程序以计算自动化、控制和管理系统的效率（见图 4.37）：

- 1) 精密计算；
- 2) 基于效率因素的计算（在标准的英文文本中称为 BAC 因素）。

使用精密计算最好是当系统完全已知的时候，即当所有的功能已经建立的时候。由一个更高水平的程序和准确度来确定描述的基于大量带有不同限定条件的不同建筑和房间的效率因素的计算和测量方法，建议在建筑中建立一个对控制系统和能量管理的初级粗略评估机制。然而，作者认为，这是由这项标准所介绍的最重要的工具。参考能源密集型应用，这种基于效率因素的方法使之可以快速评估，在表格的基础上，自动化控制管理系统的影响作为基于检查建筑节能需求的相对值。它

⊖ 它也引起了其他标准 EN 15000、EN12000 和 EN13000 的关注，专用于自动加热、冷却，通风，加热水，照明、快门控制/空间亮度，不同应用的集成控制、诊断和消费/提高自动化参数检测。

也通过采用给定的自动化控制管理水平对节约经济成本提供了直接的证据。

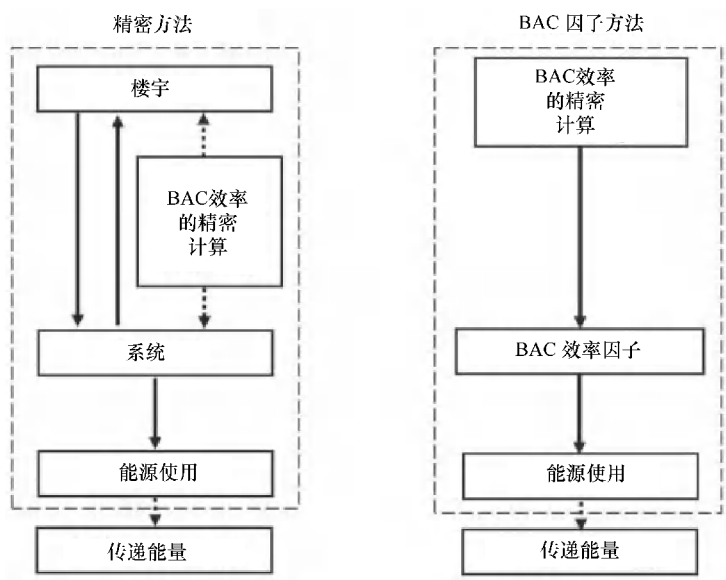


图 4.37 精密方法的流程和效率因子方法的流程（EN 15232 标准）

4.5.2.1 精密计算

精密计算包括 5 个不同的基本类型：

- 1) 直接的方法：基于模拟的系统按照 EN 13790 “建筑物热性能 – 空间加热和冷却的能源使用计算”。
- 2) 基于运行模式的方法：考虑到每个程序状态顺序不同（取暖、照明等），并为每个状态设定了能源消耗，得到每个应用程序的总消费量的总和。
- 3) 基于时间操作的方法：这个方法考虑了设备（全程使用/不使用/部分使用）的操作时间，得出达到所给功能描述的节能比率。
- 4) 基于室温的方法：这个方法将温度控制准确率（低滞后）的影响考虑到节能计算中。
- 5) 校正因子方法：此法适用于在几种因素共同影响下工作时的计算，例如在场的人、温度值和时间操作的影响。

1. 直接方法

直接方法是基于以小时为单位（EN ISO 13790）的分析模拟或模拟计算来计算建筑的节能性能的。通过使用直接方法可以计算许多自动化功能的影响，例如通过拉下遮阳帘间歇加热、改变设定点温度、加热或冷却等。显然，如果控制在时间间隔导致的相应变化小于模拟步骤，该方法将失去其有效性。

2. 基于运行模式的方法

基于运行模式的方法特别适用于自动控制系统允许能源密集型系统在不同模式

下运行的情况。一个例子是一种空调系统，它允许通风两种模式（人存在和不存在下），加热可能是正常的或间歇性的，或其他方式。在每种模式下的能量消耗和由此得到的值的总和的计算是计算对消费的影响的方法。考虑相对控制系统的状态：例如风扇的开关，这种计算可对每种操作模式执行。当然，每种模式对应于一种给定控制系统的状态。

3. 基于时间操作的方法

基于时间操作的方法用在控制系统对设备操作（开关）期间有直接影响的情况下（例如控制风扇或照明）。

消耗量（ E ）在一个给定的时间间隔（ t ）下可以使用下式估算：

$$E = PtF_C$$

式中 P ——控制系统的功率；

F_C ——控制系统的影响系数，是当系统不需要而自动关闭时总时间和时间的比率。

通过扩展，基于时间操作的方法可以使用在当控制系统调整系统而不是开关的情况下，在这种情况下，它表示等效操作时间。

4. 基于室温的方法

这种方法使用在控制系统对于室温有直接影响的情况下。原理是根据 EN ISO 13790（考虑了控制系统对室温的影响）来计算能源需求的。

一般来说，至少应该考虑以下因素：

- 1) 排放控制（加热和冷却）；
- 2) 间歇排放和/或分布控制；
- 3) 优化相关的各种控制设备的协调；
- 4) 操作系统中错误的检测以及对诊断提供支持的技术中的错误的检测；
- 5) 房间控制；
- 6) 间歇加热控制。

消费量（ E ）在一个给定的时间间隔（ t ）内可以被确定为

$$E = L[(\theta_{SP} - \Delta\theta_C) - \theta_R]t$$

式中 L ——传热系数；

θ_{SP} ——设定点；

$\Delta\theta_C$ ——实际的控制系统的影响（如果等于 0 的时刻系统是完美的，加热情况下有积极作用，在冷却的情况下起消极作用）；

θ_R ——参考温度，如在室外温度。

5. 校正因子方法

校正因子方法使用在控制系统作用于多种因素时，如时间、温度等。

消耗量（ E ）可以被估计为

$$E = EPCC$$

式中 EPC——参考情况下的消耗量，例如如果系统是理想控制，或如果不存在自动化功能或管理；
XC[⊖]——与参考案例相比较的能源消耗增加或者减少的因子，这个值取决于控件的类型，并且还极大地取决于气候和建筑的类型等。

6. 方法因素：开发板和计算公式

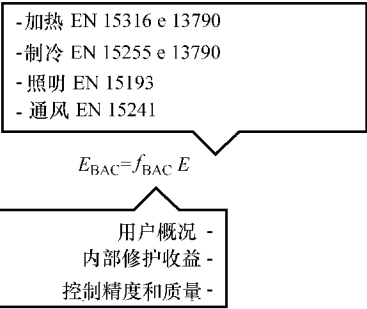
效率因素的计算方法包含在标准之内了，因此采用自动化控制管理功能的影响是年度房间消耗对比的结果，参考是在同一个房间同样的条件（时间占用率、人物轮廓、天气条件和阳光暴晒）下引入不同的自动化控制管理系统（A、B、C、D）。

效率因素的方法适用于住宅建筑以及办公室、阅读室、学校和医院、酒店、餐厅、商场和店铺。所提供的效率因素因用途不同而不同：电和热（加热、冷却）。请注意，在计算 BAC 效率因素（见图 4.38）时，人工照明所需的能量没有考虑进去，因此对照明系统的自动化和控制的影响，必须单独使用 EN 15193 标准评估。

表 4.7（来自 EN 15232 标准）直接显示了消费空间/建筑与 A 类、B 类、D 类和 C 类（即参照类）之间的关系，即显示了效率因素。

表 4.7 效率因素

建筑	建筑类型	$f_{BAC, EL}$				$f_{BAC, HC}$			
		D	C	B	A	D	C	B	A
非住宅的	办公室	1.10	1	0.93	0.87	1.51	1	0.80	0.70
	讲堂	1.06		0.94	0.89	1.24		0.75	0.5 ^a
	学校	1.07		0.93	0.86	1.20		0.88	0.80
	医院	1.05		0.98	0.96	1.31		0.91	0.86
	旅馆	1.07		0.95	0.90	1.31		0.85	0.68
	餐厅	1.04		0.96	0.92	1.23		0.77	0.68
	批发和零售贸易服务大楼	1.08		0.95	0.91	1.56		0.73	0.6 ^a
住宅的	独户住宅 公寓楼 其他居住建筑或类似的建筑	1.08		0.93	0.92	1.10		0.88	0.81



⊖ 原书中此处有误，应为 C。——译者注

作为表中所报告内容的一个总结，值得一提的是，相比与最低要求的 C 环境中，例如办公室中自动化冷却，可以节约能源。因此经济上的节约可以量化，见表 4.8 和表 4.9 中所报告的一样。即使参考 C 类为标准，实际上许多情形比较起来适应 D 类（现存的或是替换过的设备），没有任何的自动化控制和管理。在这种情况下，该差距大大增加。其实，在一间办公室的情况下，A 类建筑 and 没有自动化的 D 类建筑之间的消耗差距接近 54%。

表 4.8 不同 C 类控制系统的节能效果预测：以办公室为例

类别	节约
B	$(1 - 0.8/1) 100 = 20\%$
A	$(1 - 0.7/1) 100 = 30\%$

表 4.9 不同 C 类控制系统的节能效果预测：以居民住房为例

类别	节约
B	$(1 - 0.88/1) 100 = 12\%$
A	$(1 - 0.81/1) 100 = 19\%$

为了便于计算，从包含在 EN 15232 的效率因素 BAC 的定义表中，可以得到表 4.10 中报告的系数，为了导出消耗相对应的不同解决方案，应直接从 D 类所对应的消耗量开始。

标准 EN 15232 中所表示的系数 f_{BACi} 和作为乘法系数的 K_n 是 D 类的一个方面。

表 4.10 根据能量消耗修订的建筑自动控制系统的系数

热能		
k_c	f_{BACc}/f_{BACd}	0.909
k_b	f_{BACb}/f_{BACd}	0.800
k_a	f_{BACa}/f_{BACd}	0.736
电能		
k_c	f_{BACc}/f_{BACd}	0.926
k_b	f_{BACb}/f_{BACd}	0.861
k_c	f_{BACa}/f_{BACd}	0.852

请注意效率因素方法的使用，在早期阶段，不排除随后进行精密计算为了更准确地评估调整系统功能以使它们尽可能有效地逼近可能性。应用效率因素方法的完整例子在表 4.11 中举了出来，是指一个复杂的已知带有电气和热消耗（分别列于表 4.116a、6b 行和 1 行）的办公室。办公室的综合加热要求是 100MWh/y，无论是加热还是冷却。添加到加热需求（1 列）和损失（2 列）相关的系统，我们得到在参考期间办公室中使用的热能消耗的总和。为了判断消耗量，从一个 C 类系统到 B 类系统可以得到数据，通过使用数据因素的方法足可以使相对因素 BAC（4

列) 所对应的热能源 (3 列) 消耗相乘, 可获得带有先进效率 (B 类) 的先进自动化系统热消耗总和 (5 行), 有了这些, 能源消耗将节约 20%。辅助服务的功耗要求包括照明冷却 (6a 行) 和办公室所有消耗的照明电能 (6b 行)。使用同样的计算过程, 这一次是参考因素 f_{BACe} , 同 C 类系统比较, 节约量达 7.4%。

相同的表格可以在任何电子数据表中得到。

表 4.11 办公室从 C 类到 B 类变化的例子

编号	类型	计算	单位	加热	冷却	风扇	照明
1	热能需求 (C 类)		MWh/y	100	100		
2	系统损失 (C 类)		MWh/y	33	28		
3	总体 (C 类)	$\Sigma 1 \div 2$	MWh/y	133	128		
4	BAC $f_{BAC, HC}$ (B 类)			0.80	0.80		
5	热能消耗 (B 类)	3×4	MWh/y	106	102		
6a	附属服务		MWh/y	14	12	21	
6b	照明		MWh/y				34
7	BAC 因素 f_{BACe} (B 类)			0.93	0.93	0.93	0.90 ^①
9	电能消耗 (B 类)		MWh/y	13	11	20	31

① 根据 EN 15193 标准计算得出。

深入阅读材料

Angelo Baggini and Annalisa Marra, *Efficacia Energetica negli edifici. Il contributo della domotica e della building automation*, Editoriale Delfino, Milano, Italy, 2010.

Donald Wallace (2003-09-01). 'How to put SCADA on the internet, *Control Engineering*, <http://www.controleng.com/article/CA321065.html>.

EN 15232 2007 Energy performance of buildings – Impact of Building Automation, Controls and Building Management.

Robert Lemos SCADA system makers pushed toward security, *SecurityFocus*, (2006-07-26), <http://www.securityfocus.com/news/11402>.

J. Slay and M. Miller, Lessons learned from the Maroochy water breach, *Critical Infrastructure Protection*, **253**, Springer, Boston, 2007, pp. 73–82.

第5章 电能质量现象与指标

Andrei Cziker, Zhigniew Hanzellca 和 Ireana Wasiak

人们越来越认识到在电能的高效利用过程中电能质量（PQ）低下问题所带来的影响的显著性和破坏性，也更清楚地认识到电能质量下降造成的技术和经济影响比早先所认识的更大。

电能质量真正的经济价值与电磁干扰对电力设备和系统中的负荷的作用相联系。例如，在工业领域，现代自动化工厂中敏感的设备 and 装置构成高度复杂的生产过程，对电能质量有了更高的要求；电能质量的干扰对生产的广泛破坏性所造成的经济上的损失事实上也大大增加了。对于如此复杂的生产过程而言，电能质量的干扰会导致停工，降低劳动生产率，相应的也就导致了税收和利润的损失。电能质量低并非仅限于影响工业生产环境中的电力系统，也会对于家庭用电系统和电器带来危害^[1]。

另一方面，电源质量低下可能会增加电力系统各种元器件（如电力线路、变压器等）或电力用户用电设备（主要是感应电动机、电力电子设备、对功率因数校正的电容器组等）的能量损耗。这些附加损耗将降低电力公司和最终用户的能源效率，并增加客户的能源支出。

电能质量的经济影响通常分为三大类：

1) 直接经济影响：例如产量减少、不可恢复的停工期和资源（如原材料、劳动力、资金）、再生产成本；成品和半成品的破坏、设备损坏、生产者健康和安全相关的直接成本、未履行合约引起的经济处罚、环境经济惩罚、生产中断相关的电力开支、供电系统的附加能耗。

2) 间接经济影响：例如一个组织的成本/收益延期所造成的损失、市场份额损失导致的财务成本、品牌恢复成本。

3) 社会经济影响：如因建筑物内温度不适而引起的工作效率下降及健康和安全方面的问题；人身伤害、恐惧也同样引起工作效率下降及健康安全问题。

在低电能质量带来的损失、治理低电能质量方案的投资以及评估所能接受的低电能质量之间求取恰当的平衡是电力用户的重要举措。电力部门和设备制造商也需要评估在这种背景下他们需要多少努力来帮助终端用户减少电能质量低带来的影响。

专业文献中评估电能质量扰动引起经济影响的方法主要指电压暂降、短时或长时的电压中断以及谐波^[2]，其他干扰如电压水平波动和不平衡等属于间接经济影响和社会经济影响常常不易被认识，所以很少考虑。

5.1 电压有效值

电力网络不同特征点的电压复数值是电力系统运行状态的一个主要参数。

缓慢的电压变化通常是通过计算供电电压的有效值来确定的。在评估这个参数时，须在相当长的一段时间中进行测量，以避免个别负荷切换（如电动机起动或侵入电流）和故障对测量引起的瞬时效应。EN 50160：2009 标准使用 10min 有效值量化缓慢电压变化，并认为一个星期是最低测量周期，特别是，一周内测出的 10min 有效值的第 99 百分位被认为是该地的指标。

欧洲不同国家电压变化限制在参考文献 [3] 和 [4] 中提出：

1) 就挪威电能质量规定而言，电压有效值（RMS）以 1min 均值来测量，其变化量应在额定（标称）电压的 $\pm 10\%$ 区间内。

2) 在法国，对于中压客户，供应合同包括在 100% 的时间内电压变化限制为 $U_C \pm 5\%$ 的额定电压，其中 U_C 必须在额定电压 $\pm 5\%$ 范围内。

3) 匈牙利的规定包含 3 个不同的目标：①100% 的 10min 有效值电压值须在额定电压 85% ~ 110%；②95% 的 10min 有效值电压应在额定电压的 92.5% ~ 107.5%；③100% 的 1min 有效值电压值应小于其额定电压的 115%。

西班牙规定一周 10min 有效值的第 95 百分位应当在所声明扰动的 93% ~ 107%。

供电电压幅值可以缓慢地变化，特别是由于电力用户负荷的变化导致在线路和变压器上的电压降。电压也会因为电网运行方式和无功电源的运行状态的改变而变化。

电压降的计算已经在参考文献 [1, 2, 5, 6] 中提出。

电压的缓慢变化可以通过某一时刻电网上某一点相对于电压额定值的偏移来表征：

$$\varepsilon_U [\%] = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot 100 [\%] = \frac{U_S - U_N}{U_N} \cdot 100 [\%] \quad (5.1)$$

式中 U_S ——系统中某点某时的线电压（运行电压）；

U_N ——额定电压， U_S/U_N 的比率称为电压水平。

电压允许变化范围取决于用户的供电电压水平。按照现有的标准，220kV 及以下公用电网的电压相对偏差不得超过 10%。

设备制造商必须指出各类负荷的抗电压变化的扰动水平。一般情况下，这些值在 $(\pm 5 \sim \pm 10)\%$ 区间内，例如电压相对容许偏差是：①电动机为 $\pm 5\%$ ；②焊接机为 $\pm 10\%$ ；③电灯为 $\pm 5\%$ 。

为更好地表征电压相对于额定值的变化量，定义以下指标：

1) 时间间隔 T 内相对于额定电压的电压偏差平均值^[7]：

$$\varepsilon_{U_{\text{med}}} = \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon_U dt \quad (5.2)$$

式中 $\varepsilon_{U_{\text{med}}}$ ——供电母线平均电压的测量值，可以为准确选择变压器分接开关位置给出指示。

2) 电压偏差的有效值由下式给定^[7]：

$$\varepsilon_q^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon_U^2 dt \quad (5.3)$$

这个指数提供了一个从慢电压变化角度评估电能质量的方法，具体如下：

- ① $\varepsilon_q^2 \leq 10\%$ ：质量非常好。
- ② $10\% \leq \varepsilon_q^2 \leq 20\%$ ：质量好。
- ③ $20\% \leq \varepsilon_q^2 \leq 50\%$ ：质量差。
- ④ $\varepsilon_q^2 \geq 100\%$ ：不适合的质量。

5.1.1 电源

电力系统各点的电压不同，电压值的变化受到不同因素如发电、输电和配电过程的影响。负荷变化是决定电压变动的主要因素，另一个影响电压的因素是无功负荷与无功电源之间的平衡^[2]。

5.1.2 对能量效率的影响

根据负荷特点和电力用户在电网中连接点位置的不同引起的电压偏离额定值会导致各种后果。一般认为，对所有负荷的最优供电电压是其额定电压；任何对额定值的偏离都会影响各种负荷的运行^[8]。

5.1.2.1 照明系统

白炽灯对供电电压改变很敏感。这些特点有十分重要的实际意义与经济意义，因为电压偏差影响吸收功率 P_n 、光通量 Φ 、发光效率 η 、平均寿命 T 和色温。由于其发光效率降低，根据欧盟指令 2006/32/EC 的规定，这种灯将在不久的将来被限制使用^[9]。

荧光灯对电压变化不十分敏感，1% 的电压变化平均改变灯光强度的 1.25%。因此，这些灯即使在电压额定值的 90% 时仍能正常发光。

5.1.2.2 电动机

异步电动机是工业国家的主要电力负荷，电压的下降会增加转子转差率，降低转速，导致驱动设备的生产率降低。异步电动机的输出转矩与电压的二次方成正比，这就是为什么当电压下降，起动会变得更加困难，有时甚至导致电动机的完全停转（电动机的最大转矩 C_M 低于被驱动机械设备的静态阻力转矩 C_s ）。因此，电压下降 10%，异步电动机转矩降低 19%，转子转差率增加 27.5%，转子电流增加 14%，定子电流增加 10%^[10]。直接的后果是增加了有功功率损耗，降低了电动机的能效；由于附加能耗增加了电动机的温升，绝缘层的老化速度约达到额定电压时的两倍。若电压增加 10%，电动机转矩增加 21%，转子转差率下降 20%，转子

电流减少 18%，定子电流减少 10%。图 5.1 给出了电动机转速 Ω 随供电电压 U 的变化曲线（ p 为电动机的极对数）^[7]。

5.1.2.3 电炉

对于电阻型电炉，降低供电电压会对能源效率和工艺流程有负面效应，而增加供电电压将导致加热元件的使用寿命减少。电阻型电炉加热元件的使用寿命取决于操作温度、材料特性和元件的规格。寿命降低是由电阻材料的加速氧化及由此引起的机械和电气特性改变导致的。

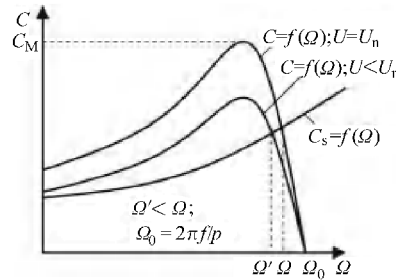


图 5.1 异步电动机随电压变化特性

三相电弧炉是工业生产中的主要用电负荷之一，在大多数情况下电能质量指标与供电协议中约定值的偏差会导致运行费用的增加。因此，当电能质量指标与供电协议中约定偏离时，根据工艺要求为原材料加温所需要的额外电能将决定损失的大小。

不同的供电电压决定了原料的不同处理时间。在通常的情况下，用于处理钢材的电弧炉，母线供电电压降低 8% 将会导致电能消耗增长 7%，生产率降低 6%。

对于按工频供电的电磁感应炉，电压降低 5% 导致生产率降低 10%，具体消耗增加 8%。

用于现代金属加工的电磁感应炉是通过一个变频器驱动的，所以供电电压降低 10% 导致供电电压频率增加 2% 左右，具体的功率消耗则增长约 5%。

5.1.2.4 其他负荷

电阻焊接设备（点焊、缝焊或对接焊）的变异供应电压在一个时间间隔的 $\pm 10\%$ 范围之内变化，对于普通类型的钢，只对工艺流程有一定的影响，而不影响产品质量。超过 10% 的电压偏差在大多数情况下将导致停止操作。

对于特殊类型的钢，实验结果显示需要维持供应电压在 $(0.95 \sim 1.05) U_c$ 内， U_c 是协议规定的电压，一般等于焊接机的额定电压。

过高的电压作用在供应棒上将造成电绝缘过度充电，从而降低其寿命。

5.1.2.5 成本

为同一电网内电力用户的供电电压选定一个最合理的变化区间包含技术和经济两方面问题，其解决方案应考虑达到一定的电压质量标准所需要的费用，以及可能发生在处于电压调节点上游的用户和电网上的经济损失，这就需要根据影响特定点之前的电网电压变化来完成。

在大多数实际情况下，损失 D 取决于额定电压 U_r 的供电电压偏差，电荷值可以用下面的二次多项式表达^[7]：

$$D = a(U - U_r) + b(U - U_r)^2 \tag{5.4}$$

a 和 b 的值特定于工艺流程。毫无疑问，式 (5.4) 这种关系只适用于一个相

对窄的供电电压变化范围。供电电压低于临界值 U_{cr1} 或高于临界值 U_{cr2} 将会导致重大损失。

负荷额定电压的供电电压偏差, 大多导致吸收功率减少, 进而导致工作设备的生产力和成品质量降低。

5.1.3 调节方法

要维持所有用户的终端电压值在允许范围内, 只有将集中控制活动(整个电力系统的一个电压等级)与就地电压控制结合才能实现。集中控制保证电网电压在某一电压平均值水平, 而就地控制系统一方面持续监测电网中各点的电压水平, 另一方面如果必要的话, 调节监测点电压至规定的范围内。

集中控制是通过励磁电流的变化来调节发电机终端的电压水平进行的。这种控制既可以自动实现, 也可手动实现。自动控制保持发电机终端在一个恒定的电压范围, 无论电荷是否变化, 而手动控制允许发电机终端电压通过系统控制其升高或降低。

在集中控制的帮助下获得一个确定的电压值是必要的, 但是不足以确保连接点上所有用户的电压都在允许值范围之内。可能的情况是, 平均水平达到了要求, 但在连接点的每个用户的电压是不同的, 一些高于容许值、一些低于容许值, 因此需要一个本地控制来维持电压值。

5.1.3.1 引入额外电压的电压控制

通过电网系统的某一点引入额外电压来控制电压, 例如改变变压器电压比。用于电网引入额外电压的设备参阅参考文献 [2, 6, 7]:

1. 带可调开关的静态设备

- 1) 有载调压和无载调压变压器和自动变压器, 用于直接控制。
- 2) 静止升降压设备、专门设计用来提供附加电压的变压器和自动变压器, 可以对电压进行间接的纵向和横向控制。

2. 无可调开关的缓慢控制静态设备

- 1) 含有短路绕组的自耦变压器。
- 2) 变压器及可以预磁化的自耦变压器。
- 3) 带有控制绕组铁心的变压器。

这些设备可以用于对电压质量方面有很高要求的用户。

感应控制器——这类控制器包含了直接或间接含有有载调压变压器的控制设备。

5.1.3.2 通过改变无功功率流控制电压

图 5.2 考虑了电网中的能量传输。如果线路的末端有一个可控装置 C , 它能够吸收或提供无功功率, 那么基于关系式:

$$\underline{U}_1 = U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} = U_2 + \Delta U + j\delta U \quad (5.5)$$

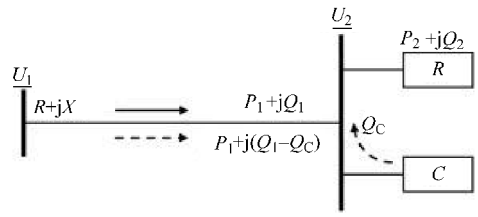


图 5.2 含有能吸收或提供无功功率的可控装置 C 的电网线路图

它可以控制电压 U_2 以满足线路末端的任何负荷变化。在线路上传输无功功率会引起功率损耗，所以选择通过改变无功功率流的控制方法必须与平衡无功功率和能量损失的一般问题相协调。

这个通过改变无功功率流来调节电压的方法分为两大类（参见第 13 章）：

- 1) 旋转补偿器：同步和异步补偿器、同步发电机。
- 2) 静止补偿器。

5.1.3.3 通过改变线路的阻抗控制电压

具有感性电抗的线路可以通过串联一系列电容器组以减少线路电抗，如图 5.3 所示。减少电压降可以降低线路感抗从而提高电压质量。如果 $X_L = \omega L$ 是线路的感抗，通过在电路上串联一个电容为 C 的电容器，线路的电抗变成：

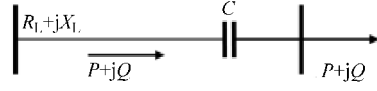


图 5.3 用串联电容器补偿线路的感抗

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \tag{5.6}$$

根据容抗 X_C 的值或比值 $\lambda = X_C/X_L$ ，也称为补偿度，可分为以下情况：

- 1) 欠补偿 $X_C < X_L$, $\lambda < 1$;
- 2) 全补偿 $X_C = X_L$, $\lambda = 1$;
- 3) 过补偿 $X_C > X_L$, $\lambda > 1$ 。

电容器的电压 $U_C = IX_C$ 应当不超出的该段电网电压的 10%。这就要求在有纵向补偿电容器的情况下，其额定电压须远小于线路的额定电压。例如，对于 110kV 的线路，电容器的使用范围为 6 ~ 10kV，而在 35kV 线路中，电容器的使用范围为 1 ~ 3kV。纵向补偿不被认为是一种控制电压的方法，因为电压的一系列变化导致电容器的电容值难以控制。此外，电力线路采用串联电容补偿也会导致共振现象、异步电动机的自励磁或谐波振荡，还增加了高次谐波共振现象产生的可能性。

5.2 电压波动

电压波动是一系列的电压有效值变化或电压周期性变化的波形包络（见图

5.4)^[2]。对于这种干扰我们可以使用术语：电压波动波形 [电压峰值包络表示为时间的函数——周期性或非周期性、确定性（很少）或随机性（经常）]、电压变化的振幅（最大和最小电压有效值的差值或扰动期间的峰值电压）和电压变化率（单位时间内电压变化量）或频率（对于周期性的波形）。

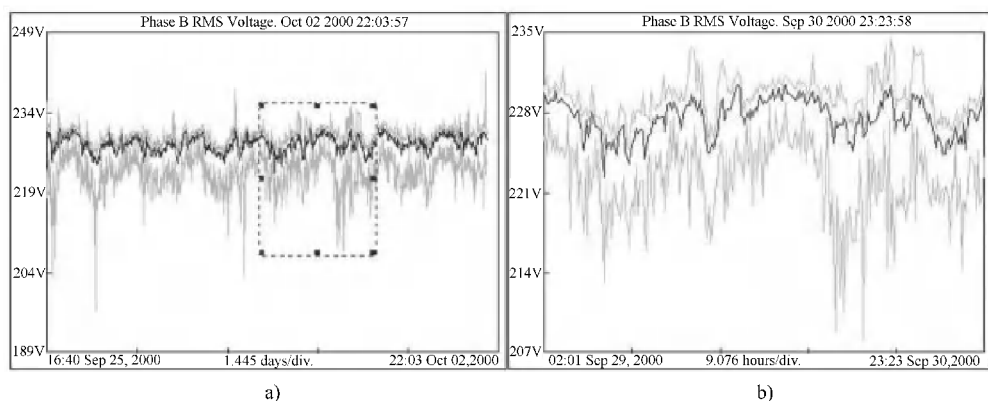


图 5.4 有效值电压波动的例子（见图 5.4a）和选定的片段的波形（见图 5.4b）

5.2.1 扰动描述

有两种基本的方法可以对电压波动做出评价。第一种方法由对现象的定量评估组成，它基于有效值随时间的变化。在这种情况下电压波动表示为坐标系中的点：相对电压变化 ($\Delta U(t)/U$) – 单位时间内电压值的变化（见图 5.5）。

对视觉感知的研究表明，由周期性电压波动引起的闪变从而导致边界曲线闪烁强度的变化是由于光通量的变化造成的。

图 5.5 所示是光源在不同供应电压下的特性曲线，曲线把平面分成两部分。曲线上面的区域定义了不可接受的电压波动值，而曲线下面是可接受的相关电压波动值。

第二种方法是间接测量，即通过一个闪变计的闪烁测量。这个仪器的输入信号为电压的变化，而不是实际的光通量变化，使用一个白炽光源模型（60W、230V 钨灯泡）和一个人类对光反应刺激模型。测量的目的是评价观察者对视觉感知干扰的反应（不适或烦恼）。

仪器输出电压波动的两个无量纲数值：每 10min 刷新一次的短时间闪变值 (P_{ST})，和每 2h 刷新（见图 5.6）一次的长时间闪变值 (P_{LT})。

通过对这些指数至少七天的测量，特别是 P_{LT} ，表示一段没有超标的特定时间，如测量时间的 95% 或 99%（所谓 CP95 或 CP99 百分位），这个值与规定的标准或指南中的极限值做比较。在大多数欧洲国家这个值在 LV 网络中等于 1。

5.2.2 电压波动的来源

造成电压变化的主要原因包括电压波动，由式 (5.5) 可得负荷功率随时间的

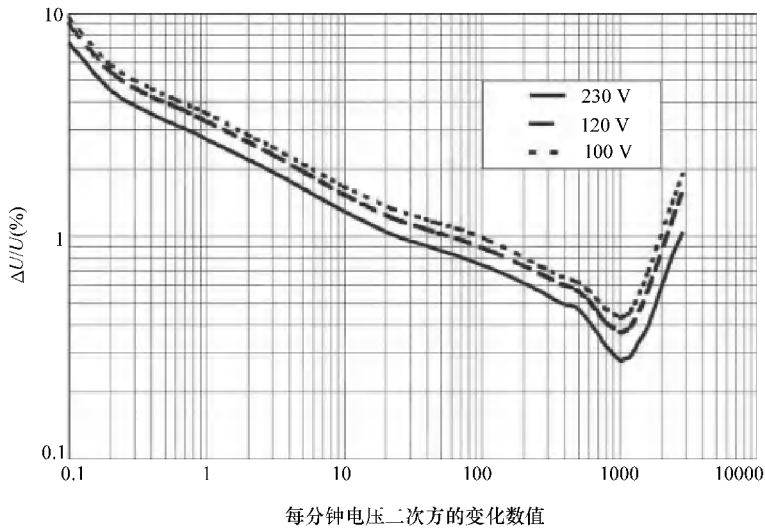


图 5.5 闪变感知边界线特点为方形，等距的电压变化应用于 60W 的白炽灯 ($P_{ST} = 1$)

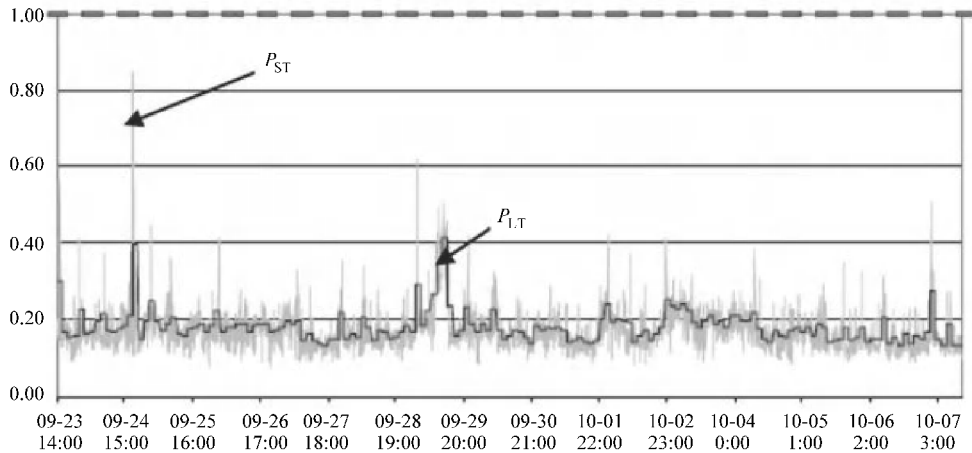


图 5.6 7 天内在一个 LV (低压) 网络衡量 P_{ST} 和 P_{LT} 的特征指数曲线

变化。这样的负荷主要是，大额定功率的工业负荷，特别是大型单独弧炉、轧机驱动器、电源的络筒机、焊接设备等。造成电压波动还可能是频繁起动电动机、点焊机、锅炉、电力控制器、电锤、电梯、起重机、电容器开关等。总之是功率很大且决定于其连接到供应端时的短路容量的可变负荷。类似的影响如 X 射线设备和大功率商用影印机。

引起住宅 LV 分布网络电压波动主要是开关的循环操作，如冰箱、洗衣机、炊具、空调等。因为是较小的独立能量，其影响力仅限于用户/负荷接入供电系统不

远的终端设备的波动,如在一个楼层或房子内。然而,它们的负面影响是由于同时操作增加了许多小负荷,如在晚间使用的电热水器。

一个特定电压波动的来源,比如调制供应电压波形时的简谐波,在电力系统中可以和远程控制信号(联锁、保护系统等)的数据传输发生耦合。

电压波动也会发生在电力系统切换过程(如变压器抽头转换开关的操作不当)和分布式能源的操作过程,如风力机。

一个恒负载、恒励磁电流和转速对称的发电机会在其输出终端产生一个恒定电压。如果这些量中的任意一个变得不稳定,电压波动就可能发生。转速的变化主要是因为发电机励磁电路的时间常数有效减小了发电机的通量变化对电压变化的影响。

在往复式发动机驱动的发电机中燃料的质量差或维护的不充分都可能导致发动机的不稳定点火以及因此引起的输出功率变化。

在很多情况中,低转速发动机输出转矩波动甚至发生在正常操作的过程中。发电机输出功率的频率变化与往复式活塞的冲程之间的关系为 $f_F = (Nn/25k) \text{ Hz}$,其中, N 是气缸数; n 是发电机转速(r/min),系数 k 的取值为:二冲程发动机取为2,四冲程发动机取为4^[11]。在往复式发动机正常工作过程中,甚至对于低速发电机,其输出功率的变化取决于发动机活塞的冲程是否足够快、波动是否发生。如果某一个气缸点火失败,电压频率的变化可以表示为 $f_F = (n/25k)$ 。在许多情况下,常用发电机电压频率的变化往往发生在最不利的区域,例如一个四缸 900 r/min 的发动机产生的波动频率是 7.5 Hz 。在 1800 r/min 时情况要好一些,它的波动频率是 15 Hz ,低于人眼可以分辨的频率范围。防止这种效应的基本的办法是保证燃料质量的控制和发动机的适时维护^[11]。

图5.7给出了一个空调系统不间断电源(UPS)的选择相电压的输出波形。这个信号的波形和频谱转换过程(从电网供应UPS)中电压波动在稳态过程是明显的。

5.2.3 效能与成本

5.2.3.1 光源

供电电压变化引起光源光通量的变化称为闪烁效应。这是对亮度或光谱分布随时间变化引起光通量变化的主观印象^[12]。这种现象同时出现在白炽灯和荧光灯光源中,尽管它们的机理和频率范围以及具有不同极限值的组件都是不同的。在电启动时整流器瞬时电压值转移到直流侧,从而改变了电灯放电条件,导致了闪烁效应。

依据公式 $\Phi \sim U^\gamma$ 白炽灯光源的光通量与电压成正比,其中指数 γ 取值范围为 $3.1 \sim 3.7$ ^[12],对于荧光灯,指数 γ 的取值范围为 $1.5 \sim 1.8$ ^[12]。

图5.8展示了白炽灯光通量的变化随供电电压周期性变化的关系。

对于小功率的白炽灯,灯丝温度下降快是由于较小的时间常数的缘故,因此白

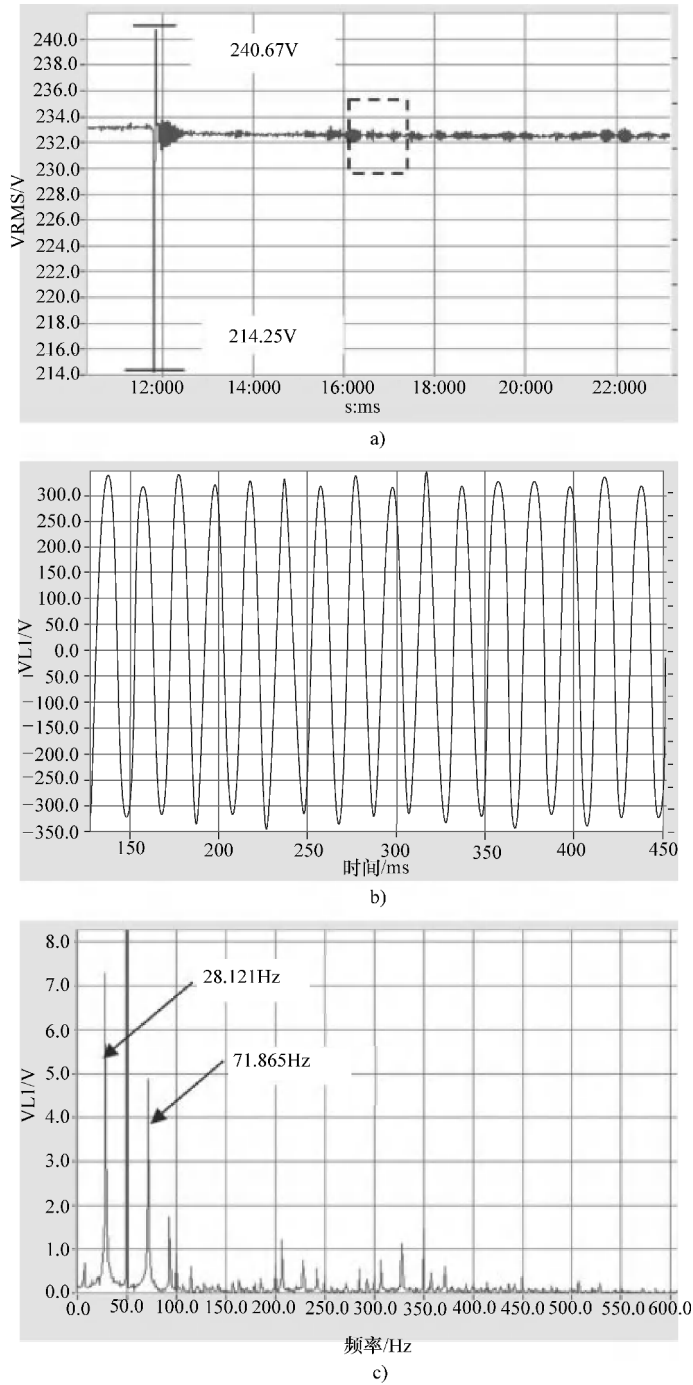


图 5.7 波形

a) 选择的相电压有效值 b) 空调系统旋转 UPS 输出的瞬时值 c) 电压频谱

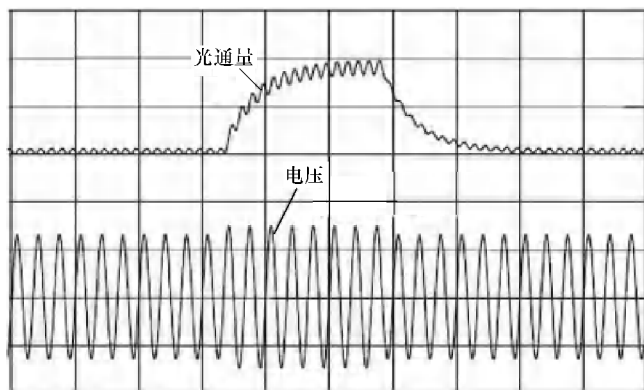


图 5.8 电压变化对白炽灯光通量的影响^[13]

炽灯更容易发生闪烁效应。

虽然不能说全部,但多数荧光灯和现代节能灯对于电压波动都不敏感,在这种情况下峰值电压比均值电压对光通量变化有更大的影响。虽然有特例,但对于灯光调节器的改变往往会增加闪烁效应发生的几率。

灯光闪烁会损害视力,造成不适和疲劳,影响工作效率。同样也会影响阅读和看电视。它对人的感官和大脑活动造成的影响可能是引起工伤事故的原因。当然,从精神物理学的角度讲,造成干扰的原因是复杂的^[12]。

5.2.3.2 电动机

感应电动机终端的电压波动可能会造成转矩的变化以及由此引起转动的不稳定,以致影响生产过程。在极端情况下,可能会导致电动机过度振动,降低机械强度,缩短电动机的使用寿命。

5.2.3.3 静态变流器

含有直流侧参数控制的相位控制变流器,其供电电压的变化通常会降低功率因数,而且也是引起非特征谐波和间谐波带的原因。在逆变器模式的驱动制动过程中,这可能会导致换向失败。

5.2.3.4 电解器和发热装置

在电压波动的情况下,电解槽的使用寿命和工艺流程的效能都有可能会降低。强电线路会产生损耗,增加维护和维修的费用。电加热装置的效率会降低,比如对于电冶炉而言,需要更长的熔化时间,但是通常情况下除非电压波动幅度特别大,否则都不明显。

5.2.4 缓解方法

电压波动的影响首先取决于其振幅和发生率。而振幅受到电力系统供应波动负载的影响,变化的速率则取决于负载类型和运作模式。它们的发生率取决于工艺流程。到目前为止,限制电压波动振幅是主要缓解办法,工艺流程在一定程度上也会有影响。例如,对于一个电弧炉而言,一个串联电抗器(也可以是可控饱和电抗

器), 正常运转的电极控制系统、断路器和一次载荷设备, 综合的电极材料等——这些方法被炼钢工艺师所熟识。对于风力机则是减少开关的数量使其保持在停滞状态, 直到涡轮风力达到一个稳定的速度, 该速度应该大于涡轮的起动速度。

如下是从式 (5.5) 得出的结论, 电压波动的振幅——通过修改后的工艺流程 (如果可能) ——可以从以下两个方面加以限制:

1. 在波动载荷耦合处增加短路功率 (与负载功率相关)

实际的手段包括: ①将负载连接到更高等级的额定电压系统母线; ②直接从高压系统通过专用线路给这类负载供电, 从单独的三绕组变压器绕组或从单独的两绕组变压器 (分离的波动载荷) 给波动负荷和稳定负荷供电; ③使用更大额定功率的变压器提供波动负荷或者降低短路电压; ④安装电容器组等。

2. 减少无功功率变化

在供应网络使用所谓的动态电压补偿器/稳定器 (见第 13 章)。

另一种可单独采取的措施是提高负荷本身对电压波动干扰的抑制^[16]。

5.3 电压和电流的不平衡

在电力系统中, 同步电动机负责提供三相电压。发电机相终端的电压幅值都是相等的, 相位相差 120° 。这样的矢量系统称为对称的矢量系统。如果一个系统的单个分离相载荷相同, 这样的系统也组成矢量对称系统。在这样的条件下, 如果电力系统的组件是线性的和对称的, 在负载总线测量的电压在正常系统操作的过程中保持对称。

5.3.1 扰动描述

事实上, 在电力系统的所有节点中获得完全对称的参数是不可能的。在三项系统中三项电压在大小上不相等及/或它们之间的位移角度不等于 120° 的情况就被定义为电压不平衡, 类似定义应用于电流中。

对于不平衡分析, 普遍应用对称分量的方法。该方法 20 世纪初引入电力系统的计算。它的主要思想是用对称系统三相的正序、负序和零序的总和来替换任何三相不对称系统的电流或电压。方程相对应的对称设置的电压可能会写做如下形式:

$$\text{正相序 (1)} \quad \underline{U}_{1A} = \underline{U}_{1A} \quad \underline{U}_{1B} = a^2 \underline{U}_{1A} \quad \underline{U}_{1C} = a \underline{U}_{1A} \quad (5.7a)$$

$$\text{负相序 (2)} \quad \underline{U}_{2A} = \underline{U}_{2A} \quad \underline{U}_{2B} = a \underline{U}_{2A} \quad \underline{U}_{2C} = a^2 \underline{U}_{2A} \quad (5.7b)$$

$$\text{零相序 (0)} \quad \underline{U}_{0A} = \underline{U}_{0B} = \underline{U}_{0C} \quad (5.7c)$$

其中 a 是转动因子: $a = \exp(j2\pi/3) = -0.5 + j\sqrt{3}/2$ 。各自的相电压是各分量之和:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{1A} + \underline{U}_{2A} + \underline{U}_{0A} \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{1B} + \underline{U}_{2B} + \underline{U}_{0B} = a^2 \underline{U}_{1A} + a \underline{U}_{2A} + \underline{U}_{0A} \end{aligned}$$

$$\underline{U}_C = \underline{U}_{1C} + \underline{U}_{2C} + \underline{U}_{0C} = a \underline{U}_{1A} + a^2 \underline{U}_{2A} + \underline{U}_{0A} \quad (5.8)$$

应用于描述一个三项电路的对称分量法,使对角阻抗矩阵消除了耦合项,大大简化了电路的分析。该方法的详细描述参见参考文献[2]。

不平衡系数 K 通常作为不平衡的衡量标准。它是负序及/或零序的电压(电流)分量之和与正序电压(电流)分量在任何一阶段的比值:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} 100\% \quad K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}} 100\% \quad \left(K_{2I} = \frac{I_{2(1)}}{I_{1(1)}} 100\% \quad K_{0I} = \frac{I_{0(1)}}{I_{1(1)}} 100\% \right) \quad (5.9)$$

上式中的下标(1)表示的是一次谐波。

多相负载产生的负序分量对于不平衡的描述是至关重要的。这是一种无关绕组连接方式的变形,同样的原理适用于正序分量。零序分量通常只出现在 LV 网络中,并且三角形联结的变压器防止其转移到更高电压的网络。

根据定义,电压正、负分量的振幅必须是已知的不平衡因素的确定值。在参考文献[17-20]中的关系允许利用线电压和相电压值的测量来计算不平衡因素。

大多数国际标准和文档中就不平衡现象及其参数的定义达成一致。LV 和 MV 系统的兼容性是 2%,特殊条件下是 3%^[18,21-23]。

5.3.2 电源

在一个电力系统中不平衡运行情况的产生主要是由不平衡负荷的运行引起的。这包括大多数的低压负荷和某些中压负荷,例如电力牵引机构,都是单相电器。在三项系统中,这种设备的运行导致了负荷电流的不平衡。因此,在供能系统的单相中产生了不平衡电压降,从而电压在网络的节点处变得不平衡。

可能导致电力系统不平衡的三相负荷是电弧炉。干扰来自熔炉不同大电流路径的阻抗和不同相负荷,这对熔化过程的物理性质造成影响,也就是各种不同的电弧阻抗。

电弧炉设备功率相对较大(数十甚至数百 MVA),炉负荷不平衡可能会导致供电系统中显著的电压不平衡。

不平衡的来源也可以是传输系统的三相组件,特别是架空线。由于不同的塔几何图形,单相上的导体并不是同时相对彼此在同一个地点接地。因此,线路有不同的相参数值,从而单相中的电压损失也是各不相同的。

5.3.3 效能与成本

5.3.3.1 电力系统

电力系统中的负序和零序电流会在技术和经济方面产生影响:

- 1) 造成电能的附加损耗;
- 2) 造成额外加热,其结果限制了线路输电能力——传输正序电流的能力;
- 3) 造成网络节点的电压不平衡,影响设备的运行。

附加的功率和电能损耗对于在单相负荷中占有重要地位的三相四线制 LV 电网

的电流不平衡有重要的影响。合成电流流经中性线的不平衡情况下，相电流矢量之和不等于零。有功功率的损耗表达为

$$\Delta P_{\text{un}} = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) R_L + I_N^2 R_N \quad (5.10)$$

式中 I_A 、 I_B 、 I_C ——相电流；

I_N ——中性线电流；

R_N 和 R_L ——相电阻和中性线电阻，产生的电压损耗与中性线电流成正比。

举例来说，让我们考虑由于一相上的电流幅值不同造成的电流不平衡，假设是 C 相。 $I_A = I$ ， $I_B = a^2 I_A = a^2 I$ ， $I_C = ak I = ak I$ ，其中 $0 < k < 1$ ，易得 $I_N = (1 - k) I$ 。非对称电流矢量系统可以由对称的分量代替：

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{3} (I_A + a I_B + a^2 I_C) = \frac{1}{3} (2 + k) I & I_2 &= \frac{1}{3} (I_A + a^2 I_B + a I_C) = \frac{1}{3} (k - 1) a^2 I \\ I_0 &= \frac{1}{3} (I_A + I_B + I_C) = \frac{1}{3} (k - 1) a I \end{aligned} \quad (5.11)$$

在导线中损失的有功功率可以用相序分量计算：

$$\Delta P = 3 I_1^2 R_p + 3 I_2^2 R_p + 3 I_0^2 R_p + 9 I_0^2 R_N \quad (5.12)$$

式中 R_p 和 R_N ——相电阻和中性线电阻。

代入式 (5.11) 并假定 $R_p = R$ 可得：

$$\Delta P = I^2 R (2k^2 - 2k + 3) \quad (5.13)$$

分析不平衡的影响，功率损耗相比计算正序电流的损失：

$$\Delta P_1 = I^2 R \left(\frac{1}{3} k^2 + \frac{4}{3} k + \frac{4}{3} \right) \quad (5.14)$$

图 5.9 说明了 ΔP_1 和 ΔP 关于 I_N/I_1 比值的函数和不同相线横截面积与中性线横截面积 S_p/S_N 的比值关系。这个简单的例子充分说明了不平衡对功率和电能损失的消极影响以及由此导致的对功率传输效率的消极影响。增加中性线的横截面积可以作为减少损失的一种方法。

5.3.3.2 异步电动机

异步电动机的绕组通常通过星形或三角形联结的方式与一个孤立的星点相连。因此，电动机的运转只与正序和负序分量有关。负序电流产生一个与转子旋转方向相反的通量，这个通量造成了：

- 1) 定子绕组的发热增加；
- 2) 定子有功功率的额外损耗；
- 3) 产生与正序通量转矩方向相反的额外转矩；
- 4) 在电动机绕组和转子铁心中产生感应电流，因此引起转子功率额外损耗。

电动机电流在不平衡条件下可以几倍于额定电流。长时间的不平衡会加快电动

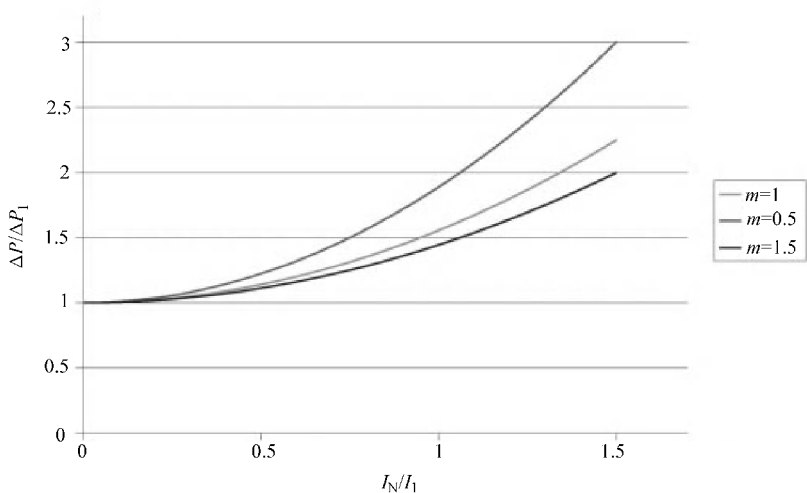


图 5.9 由于电流不平衡在三相四线制电路中消耗的有功功率在不断增加（其中 $m = S_p/S_N$ ）

机绝缘性能恶化，缩短了使用寿命。电动机可以配备能检测过电流并关断的保护器。

由于供电电压产生的不平衡造成额外功率损耗在一定程度上减小了电动机的最大功率，这种影响取决于不平衡的程度、电动机的类型及其构造。

负序转矩会造成电动机有效转矩的减少。此外，对于不平衡的供电电压，会造成电动机的振动，也会导致使用寿命的缩短。

试验测试表明，大多数异步电动机最高能承受的不平衡电压率为 2%，这是公认的极限值。

5.3.3.3 同步发电机

负荷不平衡主要影响工业热能和为电网供电的电站中发电机的正常运行。供电网电站发电机都离不平衡负荷有一定距离，因此在这种情况下，负荷的不平衡影响就不那么显著了。

对于同步电动机的负序分量来说，对负荷不平衡的分析可以忽略。因为发电机通过变压器连接到电力系统中，其中一侧的绕组通过三角形联结以防止零序电流进入发电机。

负序电流在发电机中产生和正序电流产生磁通方向相反的磁通。与异步电动机类似，这个通量会影响发电机的转子和定子，它会感应出涡流，增加发热量和功率损失。负序电流会在电动机的转子和定子上产生机械作用力，这对于电动机的受力部件来说是危险的。

评定不平衡条件下发电机允许操作的基本准则是转子的附加热量。

一般来说，对同步发电机的运行，不平衡负载并不是一个大问题；不平衡可能会在干扰中引起更严重的危害，例如在不对称短路中。

5.3.3.4 静态整流器

转炉设备在大多数情况下是三相三线制系统，因此它的运行只受电压负序分量的影响，它生成：

- 1) 整流电压（电流）的一个额外变量组成部分，其振幅依赖于不平衡因素；
- 2) 对于给定的整流器和简谐波的拓扑结构，谐频是无特性规律的。^[24]

5.3.3.5 其他负荷

不平衡也会影响其他三相负荷的运行，改变电力大小、应用特征和它们的使用寿命。此外，电压幅值的变化引起的电压不平衡对单相负载的运行也有影响。它们中的一些可能会受到供电电压过高或过低的影响。干扰也会发生在控制系统的运行中，导致一个扰动，甚至一个运行设备的中断。

5.3.4 缓解方法

电力系统组件的失衡可采用适当的方法消除。在架空线路中，换位导线正是出于这个目的而被应用。这个线被分成若干部分，但分成的若干部分应该可以被 3 整除，规定每 3 个部分组成一个换位周期。在每个部分中，给定相的导体与其他相的位置不同，因此导致作为一个整体的导线，可以被认为是对称的。

不平衡的缓解方法主要是平衡负荷。传统的负荷平衡方法是将名义载荷均匀地分配到每相。通常这是足够的，因此严重不平衡的电压并没有频繁出现。当严重的负荷不平衡不可避免出现时，尤其是对于大型单相负荷，应采用特殊的平衡设备进行扰动补偿。其目的通常是消除或限制负荷电流的负序和零序部分，这个过程称为平衡。

5.3.4.1 平衡的原则

在通常孤立或补偿运行的三相中压（MV）系统中，不平衡负载被连接到一个线电压上。在这种情况下，没有零序分量的电流，所以平衡解决的是本身负序分量的消除或限制。LV 电网是四线接地系统，所以在那里出现负序分量与零序分量。

一个平衡装置（BD）并联不平衡负荷（UL）（见图 5.10），这种设备使电流 I_{Ak} 、 I_{Bk} 、 I_{Ck} 流出，增加了负荷电流 I_{A1} 、 I_{B1} 、 I_{C1} ，使电源电流 I_A 、 I_B 、 I_C 成对称组。

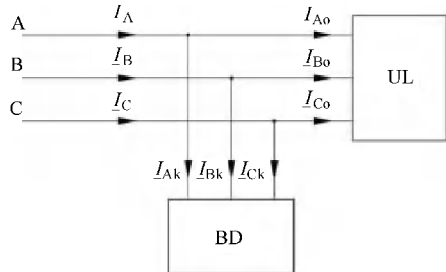


图 5.10 带有平衡设备的非平衡负荷

对于不同种类的平衡负荷电流系统，一般根据元件的数量和类型以及连接方式

的不同来进行区分。这方面的信息可以在参考文献 [25] 中发现。BD 在恒定负荷下完成其任务。对于时变负荷, 如电力牵引或电弧炉, 后续补偿是必要的。这种补偿通过以下方法实施:

1) 并联补偿装置 [静态无功补偿器 (SVC) 如 TCR、FC/TCR 和 STATCOM, 见第 13 章]。连接到电力网络的一个节点, 它们可能被认为是控制的并行电纳。平衡这个任务, 可以通过这些设备达成, 它们通常也应用于补偿无功功率或电压波动限度和光闪烁现象。补偿的目的是控制电流或电压的负序和零序分量。

2) 串联补偿装置是为了缓和供电电压的不平衡。例如通过一个 PWM 变换器生成该系统的目的是补充电势 U_b , 其值和相位与电源电压 U_s /电流 I 相关。变换器可以被认为是一个电压源, 由两个具有规范值的正交分量代替:

① 分量 U_{bd} (与线电流同相或反相) 与线电流相关, 决定供应系统和补偿器之间的有功功率的交换。

② 分量 U_{bq} (正交于线电流) 决定串联补偿无功功率的值 (也是特性)。

5.4 电压和电流的畸变失真

电力系统的组成部分被设定为工作在正弦条件下, 并且在电路中, 电压和电流的曲线是一个与额定频率相同频率的正弦波形。而事实上, 现今在大多数的节点电力系统中, 电流和电压的波形都会在一个正弦曲线基础之上呈现一定扭曲^[2,7,24]。

这种电流或电压正弦波形周期性的偏差叫做失真或者变形。

失真是由电力系统组成部分的非线性特性引起的。用户负荷的非线性特性是电流曲线失真最频繁的来源, 而电流的失真也直接导致了供电电压曲线的失真。随着采用功率半导体器件的指令控制系统的发展, 失真电流的来源逐渐开始广泛传播。在电力系统中, 它们的存在将导致系统需要采取补充的行为来识别各项干扰源, 评定干扰因素和影响以及采用补充行为来限制由失真引起的损害, 无论是在电网中, 还是在用户与谐波污染电网相联系的情况下。

为了评估电流和电压的失真所产生的影响, 设立适合关于失真定义等级和失真容许值指标必须引起我们特别重视。

5.4.1 干扰描述

通过傅里叶理论, 在有周期性信号的情况下, 失真曲线可看做是由许多频率为基频的整数倍的正弦波叠加而成。在这种条件下, 通过计算组件振荡的特征值, 对失真曲线的分析可在频域中完成。如今, 这种评估方法得到了广泛的应用, 同时它也是现今所有测量方法、分析方法和评估各种限制失真水平方法的基础。

图 5.11 所示为一个失真的波形以及组成它的谐波频谱。使用傅里叶级数, 任

何周期性失真信号都能采用下式进行分解：

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sqrt{2} \sin(k\omega_1 t + \alpha_k) \tag{5.15}$$

式中 U_0 ——信号的直流分量；
 U_k —— k 次谐波分量的有效值；
 α_k —— k 次谐波的相角。

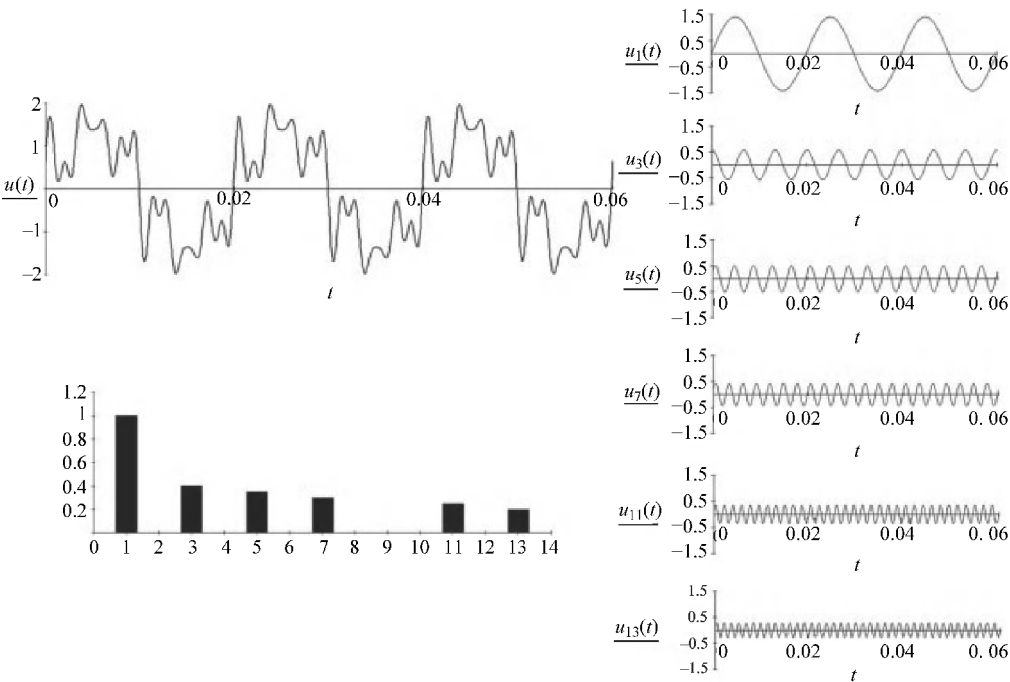


图 5.11 组成它的失真曲线和谐波频谱

考虑到在电网中，周期性的条件并不总是得到满足，式（5.15）只在电气参数被认为是周期性的条件下才适用。基于这个分解，一系列的指标被用于定义失真曲线的频谱分量。任何一个频域的指数不能明确定义一个失真的曲线，那就意味着应该使用几个指数。表 5.1 给出了一些用来定义失真状态的主要指数。

由于失真这个问题已经被研究了几十年，因此谐波标准化的过程也可以认为已经相当完整了。但另一方面，内在谐波标准化的过程却并不成熟，它的研究还在进行中，关于它的知识和测量数据仍有待进一步累积。

标准描述定义了电压供应上的限制、测量方法还有设备仪器、缓解过程等，而主要的 IEC 标准对于谐波和内部谐波的处理列于参考文献 [2] 中。关于谐波的本质基本标准是 EN 50160^[21]、IEEE 519—1992^[28] 和 IEEE 1159—2009^[29]。

表 5.1 失真状态下的主要性能指标

指标	计算公式	注释
有效值	$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}$	u 定义了一定时间内电压的变化； T 指的是时间间隔
半周期的平均值	$U_{\text{med1/2}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u dt$	这表明了在周期 T 中，直流电压可以在对交流信号整流后得到
峰值因子	$k_v = \frac{u_M}{U}$	u_M 是周期性非正弦曲线的最大值；峰值因子有以下情况： 1) 正弦曲线的情况下：$k_v = \sqrt{2}$ 2) 曲线斜率大的情况下：$k_v > \sqrt{2}$ 3) 曲线斜率小的情况下：$k_v < \sqrt{2}$ 电压曲线峰值因子 $k_v > \sqrt{2}$ 决定了电气设备绝缘危险超负荷
波形因数	$k_f = \frac{U}{U_{\text{med1/2}}}$	波形因数有以下值： 1) 对于正弦曲线 $k_f = 1.11$ 2) 对于周期性曲线但比正弦形式更陡 $k_f > 1.11$ 3) 对于周期性曲线但比正弦形式更平缓 $k_f < 1.11$
谐波比	$\gamma_k = \frac{U_k}{U_1}$	谐波水平在评价失真水平时是一个重要的指标，标准中赋予电力系统节点电压曲线最大容许值
失真（谐波）含量	$U_d = \sqrt{u^2 - U_1^2} \cong \sqrt{U_0^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}$	失真含量是衡量失真信号谐波分量所产生的热效应的物理量
失真系数	$\text{THD} = \frac{U_d}{U_1}$	畸变因子，总谐波失真（THD），是一种用于评估失真最高水平的指标，其在电力系统节点中的最大允许值是由规范指定的

5.4.2 失真源

电力系统中失真源的存在决定了进入电网中的畸变电压或电流的产生和分配。在实践中，最常见的扭曲频率从几赫兹到近 10kHz。

表 5.2 提供了一些电力系统中最重要的失真源、它们的等级和它们生成的谐波的振幅^[3,26,30]。

表 5.2 能量系统的失真源

失真源	失真源产生谐波的等级和振幅
1) 带电阻的电荷或电流的全控或半控单相整流器（全桥），尤其是在退出整流器时连续过滤	1) 奇数阶谐波
2) 带电阻负载的交流电力控制器	2) 幅度随阶数的增加而降低
3) 家用电器	3) 在半控制或控制整流器的情况下，晶闸管相位角的各种值的某些频率消失
	4) 奇数和偶数阶谐波
	5) 当阶数增加，谐波的振幅减小
	6) $k = mp \pm 1$ ($m = 1, 2, 3 \dots$) 谐波
4) 带电阻电荷或电流的单相整流器（半桥），在退出时基本上是连续过滤	7) 谐波的振幅随等级的降低，大致能满足以下关系： $I_k = \frac{I_1}{k^{1.2}}$
5) 相位识别脉冲整流器	其中 I_1 是基准有效值； k 是谐波的阶
	8) 在半控制变换器的情况下晶闸管相位角的各种值的某些频率消失
6) 饱和的通用电机	9) 奇次谐波
	10) 第 3 次谐波的幅度低于 15% 的基准值
7) 荧光灯管	11) 当它们的阶数增加时，高次谐波的振幅迅速降低
	12) 在加热过程中，偶次谐波出现
8) 自动洗衣机	13) 奇次谐波
	14) 当只有一个半波整流时的偶次谐波
	15) 当谐波的阶数增加时，减少它的幅度
	16) 使用半波整流的系统：
	① 奇次谐波
	② 第 3 次谐波电流的幅度可能达到 80% 的电源电流基波幅度
	③ 随着其等级的提高谐波的幅度减小
9) 彩色电视机	17) 使用单一半波整流系统：
10) 电烤箱	① 奇数和偶数阶谐波
	② 第 2 次谐波电流的幅值低于电流基波幅值的 45%
	③ 随着等级的提高谐波的幅度减小
	18) 奇数和偶数阶谐波
	19) 第 2 次谐波电流的幅值，与电流基波幅值相差约 5%
	20) 谐波的幅度随着它们的阶数增加而减小
	21) 第 5、7、11、13…次谐波
	22) 第 5 次谐波电流的幅值低于基准电流幅度 20%
	23) 谐波的幅度随着它们阶数增加而减小
11) 电弧炉的静态补偿器	24) 奇次谐波
	25) 第 3 次谐波电流的幅值低于基准电流幅值 20%
12) 带单相整流器的电力机车	26) 谐波的幅度随着它们阶数增加而减小

5.4.3 能效与成本

非线性元素在电力系统中十分重要，无论是就装机容量而言，还是从设备的类

型而言，都会增加它们的谐波污染并且因电网中谐波存在而增加了负面效应。这些影响可以分为两大类，见表 5.3。

表 5.3 由谐波失真所产生的负面效应的分类

技术角度	从经济的角度
1) 系统部件对谐波电流（焦耳损失、干扰音频）或变形的电压（在磁路和介电材料中的损失；过电压，在某些情况下，可以高于允许的水平）都敏感 2) 某些设备的正常运行受存在的电压和/或电流谐波的影响（控制系统、设备与电网电压同步等等）	1) 以增加制造费用来限制各种设备的具体非线性或为了增加对干扰的免疫水平（设备应符合强制免疫规范） 2) 预防或纠正运行维护费用的增加 3) 电能的生产成本增加，一般由于过大的网络元素而导致的电力系统的投资

5.4.3.1 电力系统能量效率的减少

谐波电流流过电网的要素会导致导磁性材料和绝缘材料有功功率损失的增加。导体材料的附加损耗功率是由谐波电流流过电网元素而产生的，以及由这些元素的电阻增加而产生（后者是受趋肤和邻近效应的影响）。

假设忽略连续成分，这些损耗可以从下式计算^[6,7]：

$$\Delta P = 3 \sum_{k=1}^{\infty} R_k I_k^2 \tag{5.16}$$

式中 I_k —— k 谐波电流有效值范围；
 R_k ——一个电阻元素，用于计算秩 k 的谐波频率。

交变电流流过的元素叫 $R_{a.c.}$ ，计算公式：

$$R_{a.c.} = R_{d.c.} (1 + r_s + r_p) \tag{5.17}$$

式中 $R_{d.c.}$ ——直流电阻；
 r_s ——考虑到趋肤效应的电阻；
 r_p ——考虑到邻近效应的电阻。

假设电阻 R 不随频率变化而变化，其直流分量为 0：

$$\Delta P = 3R \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 = 3RI_1^2 (1 + THD_1^2) \tag{5.18}$$

式中 THD_1^2 ——电流的总谐波失真。

式 (5.18) 表明，如果系统运行在非正弦而不是正弦的条件下，导电部件的活性损失会大大增加。

磁性材料的损失是由磁滞现象和/或涡流引起的。介电材料的损失主要位于电容器的介电以及架空或地下的绝缘电线。损失是由电流的活性组成部分和介电材料的绝缘电阻产生的，两者的值取决于 k 次谐波损耗角的值。

5.4.3.2 趋肤效应

趋肤效应是交流电在导体的外表面流动的现象。这种效应在高频率下表现得更加明显。事实上，它通常是被忽略的，因为它在电源频率下的影响很小，然而当频

率达到约 350Hz (7 次谐波及以上), 它将会变得明显, 并引起额外的损失和热能。交流电阻与直流电阻之比是取决于 r/δ , 此处 r 是导体半径, δ 是电流穿透厚度, 可表示为 $\delta = (2\rho/\omega\mu)^{1/2}$, 其中 μ 是磁导率 (H/M), ω 是频率 (rad/s), ρ 是电阻率 ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)。很明显, δ 取决于频率, 尤其是它会随着频率的增加而减少^[2]。

5.4.3.3 电网过电压

电网中各节点和各种设备的端子中电压的增加, 可能是电压谐波上的谐振或潜在的星形联结变压器和三相接收机上中性点的增加所致。

5.4.3.4 在星形联结情况下的中性点电位的增加

一个好的平衡负荷或降压三相变压器连接到一个带有正弦基波频率平衡的三相电网电压, 如果它为星形联结, 则中性点对地电位等于零。如果电网受一个非正弦周期状态影响, 设备终端将会接收一个谐波电压, 而这决定了中性点对于参考地面的电位, 其数值取决于相线和中性点电路之间的谐波阻抗之比。

5.4.3.5 三阶段电网中性线路的超负载

在拥有 4 个导体平衡电网的情况下, 谐波电流的存在, 确定了通过中性导体的谐波电流的流动, 通过总结获得了三重谐波。谐波电流 $3k$ 可能由电流不平衡决定, 因此, 导体的过热是可能的, 尤其是在常规结构中, 其横截面相对于其他活跃相位处导体效果更差。中性线路过热问题主要出现在低压配电网络, 其中大部分用户是计算机使用者以及排放气体或金属蒸气的照明装置。它们的特点是很高的三次谐波值 (其值可以达到 80%), 以致产生中性导体高电流。由于导体没有保护装置, 引起过热、火灾的风险是极大的。

5.4.3.6 三相变压器效应

在谐波污染电网中对三相变压器的操作有以下后果^[1]:

1) 由于不同电流谐波绕组电阻的增加, 导致导体材料中有功功率损失的增加。

2) 高次谐波存在的情况下, 磁性材料损失的增加主要是由于涡流损失增加。

3) 绝缘电应力的增加, 都是由终端电压及其变化速度的最大值确定的。

4) 产生额外的机械应力。

5) 增加运行时电流畸变因子值的磁化曲线的非线性部分 (因过充电, 这种状态可认为是由谐波污染确定的, 在这种情况下, 有可能降低电压谐波产生高水平的电流谐波)。

电力变压器非正弦状态功能的主要作用是绕组和核心温度的增加代表补充损失。为了避免加热到高出制造商允许的最高温度, 减少负荷是必需的, 即施加额定功率的折旧因素:

$$S = k_t S_N \quad (5.19)$$

式中 S ——非正弦状态下的视在功率;

S_N ——变压器的额定功率;

k_t ——折旧系数，可以使用以下关系确定：

$$k_t = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1 \sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_k}{I_N} \right)^{k^{1.6}}}} \quad (5.20)$$

式中 I_N ——变压器的额定电流；

I_k ——秩 k 谐波的有效值。

5.4.3.7 旋转电机的运行效应

在有旋转电机的情况下，主要出现的负面影响取决于它们所连接的谐波污染电网，这些负面影响如下：

- 1) 由于导电和磁性材料的附加损耗导致了绕组和磁心温度的升高；
- 2) 电机转矩的变化，导致其效率降低；
- 3) 电机轴上转矩振荡的存在，促进材料的老化和额外的振动；
- 4) 由于高次谐波的影响电机间磁感应变化；
- 5) 由基波导致的磁通量和由更高一次谐波导致的磁通量之间的关系。

当电机由频率静态调速装置（VSD）反馈时，在变速传动的情况下会出现特定的问题，也就是电能转换器（除了包含 PWM 控制的逆变器）产生一个高度扭曲的电压，这个电压会导致高热量的产生以及电机机械磨损。所有这些情况需要一个可以减少扭曲和电机磨损的实际可能性分析。

5.4.3.8 电子设备非正弦周期态上的影响

用于控制系统中的电子设备通常是由正弦电压供电，但它们有可能代表它们所连接网络的失真源，而这取决于它们是以何种方式改变控制值（相位控制、时间控制等）。当一个非正弦电压施加到这些设备的端子上时，安装的技术特性发生改变，这会导致在控制和设备运行上的负面影响。

谐波污染影响电子设备的几种方式如下：

1) 由于谐波失真，可能会产生多个过零点电压曲线，这是一个问题。因为大量的电子电路是基于零交叉的电网电压的同步操作。

2) 必须考虑电压曲线的振幅和峰值的值，因为一些电子资源使用此信息的滤波电容器充电。然而谐波的存在可能决定了电网电压的增加或减少，因此即使输入电压有效值等于额定值，由电源给定的电压也被修改了。由电源提供的设备操作的影响从一个更高的电压灵敏度开始转变为显著的误操作。为了避免这样的效果，一些电脑制造商限制峰值到 $k_v = \sqrt{2} \pm 0.1$ 并且提出另外一些要求，使得总畸变率不应超过 5%。

3) 在调制基本频率的振幅时，间谐波、次谐波会影响显示器和电视的操作。在 0.5% 以上水平的组件的情况下，图像的一些周期性变化可能会出现（对于阴极射线管）。

5.4.3.9 对电容器组效应

在三相电网的情况下，高次谐波出现时，用于功率因数校正的属于过滤器或设备的电容器组会遭受如下过载现象：

- 1) 由于介质而产生额外的热量。
- 2) 由于污染水平的扩增产生的长期超载。

3) 电压或电流的共振现象，对已经存在的系统谐波有一个放大的影响：在串联共振情况下，特定的谐波中的电流值和谐振元件中的电压值有所增加；在并联共振情况下，系统中的电压和电容器中的大电流存在过负荷现象。

5.4.3.10 经济损失

电网存在谐波引起损失的主要原因如下：

- 1) 为限制特定的各种设备的非线性或增加对失真的抑制力水平而产生的制造成本增加（满足抑制规范的要求）；
- 2) 在预防和纠正维护操作的情况下，操作费用的增加；
- 3) 由于电网中各部件规格过大，电能生产和电力系统中的投资费用都会增加。

5.4.4 缓解方法

基本上，电力系统的污染将会成为问题，如果：

- 1) 谐波电流源太强；
- 2) 该系统通过谐波的部分太长（从电的观点来看），从而导致要么系统电压的失真不可接受，要么是其他系统的干扰不可接受（一般指电信干扰）；
- 3) 系统的频率响应放大一个或多个谐波。

考虑到这些负面后果的存在，有必要采取一定方式，来减轻或消除这个问题。主要的方式有^[2,6,7]：

- 1) 减少由非线性负荷产生的谐波电流；
- 2) 限制谐波电流通过交叉的区域；
- 3) 改变电力系统的频率响应；
- 4) 安装过滤器，可以减少电力系统和用户的谐波电流分布安装之间的双向流动。

现今有很多方法可以采用。表 5.4 给出了这些方法的概述，并列举了一些在工业中经常遇到的关于干扰接收机的应用^[7]。

为了减少扭曲的状态，经典的解决方案是基于使用无源元器件（电感器、电容器和变压器）或对配置的干预及/或构造用户电力供应系统从而减少大量带电的公共连接点电压的失真程度。半导体器件技术在过去的几十年得到了主要的发展，在降低失真的技术和设备方面拥有重要影响。因此，基于设备和高性能半导体电路的方法已经完全取代了传统的消除谐波污染的方法。

表 5.4 缓解干扰的解决方法

限制干扰状态的方法和途径	减少谐波电流	整流器	安装交流电抗器在变换器的输入处
			提高直流侧电抗器的值
			使用多脉冲模式
		PWM 逆变器	安装交流电抗器在输入线路处
		电弧炉	限制电抗器
			减少短路电抗
	改变电力系统的频率响应	增加变压器电能	
		安装一系列带电容器的失谐电抗器进行功率因数校正	
		改变电容器的放置用以功率因数的校正	
		分解电容器	
	限制谐波电流可以流过的区域	使用合适的隔离变压器的电源	
		使用Y/Z 变压器	
	谐波滤波器	无源	只用一步
			用几步
		有源	串联
			并联
		混合	

5.4.4.1 无源滤波器

从电流波形畸变的频率分析出发，消除谐波电流的最有效的方法之一是使用无源滤波器。一般情况下，一个无源滤波器由多个以谐波为目的的 LC 串联谐振电路组成，即一个零电抗的即将被滤波的 k 谐波。这些过滤器可以按应用领域分类^[2,27]：

- 1) 被动抑制滤波器；
- 2) 被动吸收滤波器。

第一种类型的过滤器已经广泛地应用在由于非线性接收机的存在使谐波传输增强的情况下，如图 5.12 所示^[30]。对于非线性的用户，一个已知的稳定状态使用被动吸收过滤器作为一个在电网中的谐波限制转移的最有效手段，限制电容器的电荷对其功率因数进行校正。

吸收滤波器由串联电路的调谐谐波 k 形成，如图 5.13 所示。过滤器的作用是使它的每一个共振回路都出现一个可容性的特性，针对的是频率低于共振频率定义的 k 谐波和频率高于该值的电感性。因此，针对基本频率，每个电路产生无功功率，这种无功功率在对功率因数校正系统进行大小排序时应该考虑。用户供电母线滤波器阻止谐波的存在，因此停止供电电压无畸变^[7,30]。

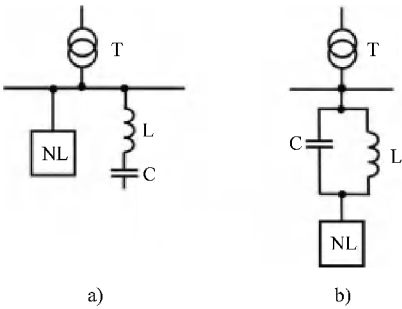


图 5.12 抑制滤波器
a) 并联 b) 串联
注：NL 即非线性负荷。

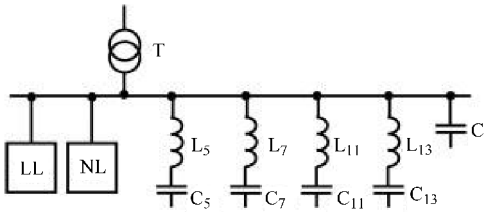


图 5.13 连接吸收滤波器至失真用户的分支线路中
注：LL 即线性负荷；NL 即非线性负荷。

5.4.4.2 有源滤波器

有源滤波器基本上是一个静态功率变换器，它综合了电流或电压理想的信号形式；信号被注入/应用于交流电网中的某一点，并在其达到参数的设定值时，有源滤波器能模拟出理想阻抗。

对比减少电网谐波污染的方法，有源滤波器与其他传统方式（无源）滤波器相比优势主要有：

- 1) 高响应速度；
- 2) 确定和/或执行滤波器的功能的灵活性（现代有源滤波器能同时执行多种功能，这些功能可以很容易被地激活或中止和/或修改）；
- 3) 消除补偿装置与配电网的谐振问题，特别是传统的解决方案存在的问题（无源滤波器、电容器、变压器和专门设计的变压器）。

表 5.5 给出了有源滤波器的分类。

表 5.5 有源滤波器分类

分类标准	有源滤波器的类型
滤波器所设计的回路或电路类型	直流
	交流
操作和连接到电网的类型	并联
	串联
	串并联
安装滤波器使用的静态电能变换识别装置	电压源逆变器
	电流源逆变器
安装时用的结构和技术	有源
	混合
相数	单相
	三相

根据合成信号的类型（电压或电流），有几种将有源滤波器连接到电网的方法——并联或串联，即主动将滤波器并联或串联。在总功率质量管理概念的背景下，几种结合电流源的结构和电压源逆变器的复杂设备，已经被研制成功并投入生产。它们被称为有源串并联滤波器，而且它们结合了这两个设备的功能和性能。表 5.6 显示了有源滤波器的主要类型。

表 5.6 有源滤波器的主要类型

有源滤波器类型	基本图示	描述
并联		并联有源滤波器是一种实现电流源功能的装置。通过滤波器 i_{FA} 合成电流信号，注入到连接点的目的如下： 1) 补偿由用户产生的谐波电流 2) 补偿接收机的功率消耗 3) 缓和由潜在的共振现象产生的可能，由于连接到同一点的并联无源滤波器存在下发生的影响 4) 平衡电流系统吸收的连接点
串联		串联有源滤波器实现电压源的功能（通过滤波器合成的信号已标记为 u_{FA}），使用匹配变压器串联连接配电网是为了： 1) 降低电压信号的失真 2) 电压系统的平衡 3) 降低电压骤降、电压波动 4) 确保电源只会短时中断 5) 减少高频率的现象扭曲电压系统 6) 减少闪烁的水平 7) 调节电压有效值

(续)

有源滤波器类型	基本图示	描述
串并联		这些复杂的设备将电流源与电压源相结合，实现并联和串联有源滤波器在名称和功能特性上的统一

5.4.4.3 混合滤波器

混合滤波器是有源和无源滤波器的混合，它降低成本，提高滤波效率。图 5.14 给出了 3 种混合滤波器的结构，表 5.7 给出了这些滤波器的性能比较^[27]。

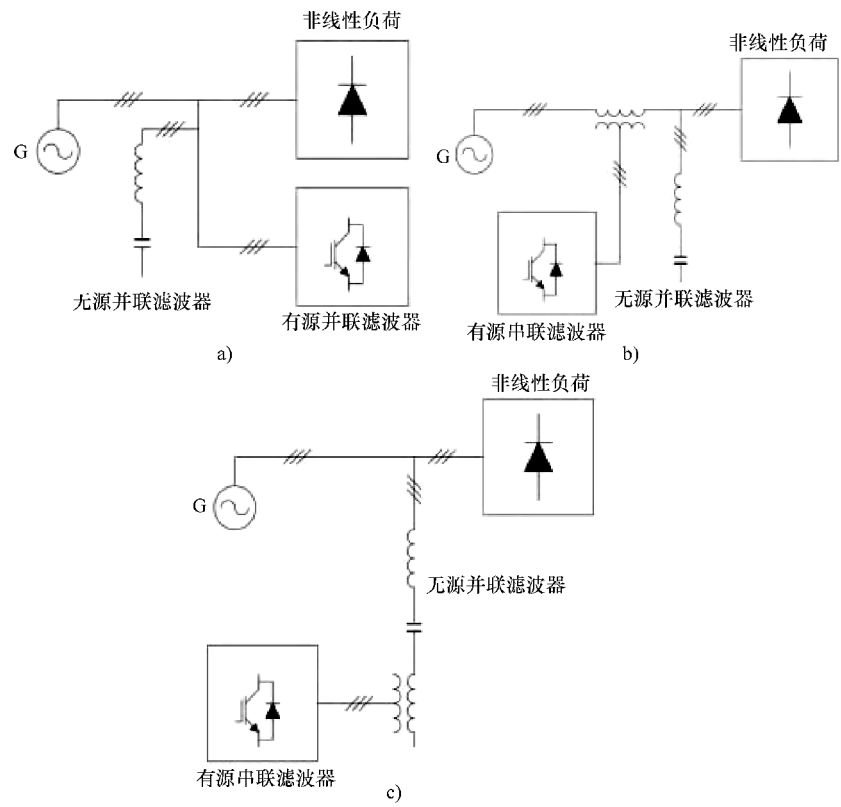


图 5.14 混合滤波器

a) 并联—并联型 b) 串联—并联型 c) 并联—串联型

表 5.7 混合滤波器结构的比较研究

混合结构构造	并联—并联型	串联—并联型	并联—串联型
	见图 5. 14a	见图 5. 14b	见图 5. 14c
用于实现有源滤波器的静态变换器类型	有电流环控制和 PWM 逆变器的电压源变换器	有 PWM 逆变器而无电流环控制的电压源变换器	有 PWM 逆变器和有/无电流环控制的电压源变换器
有源滤波器的功能	1) 补偿谐波污染 2) 减少谐波污染	1) 隔离失真用户 2) 减少谐波污染	1) 减少谐波污染 2) 补偿谐波污染
结构的优势	1) 允许有源并联滤波器每一类型的使用 2) 允许功耗补偿	1) 允许采用已经存在的无源滤波器 2) 有源滤波器阻止了谐波电流的流动	1) 允许使用现有的无源滤波器 2) 允许有源滤波器的简单的有效的保护
结构的劣势	相对独立的有源和无源工作频率范围	1) 有源滤波器的过充保护困难 2) 不允许功耗补偿	不允许功耗补偿
观察现象	两个滤波器彼此完全并联, 这表明当有源滤波器工作频率不超过无源滤波器的频率时, 谐波电流不会分流。有源滤波器的存在大大提高了补偿的效果, 可以减少无源滤波器的使用数量及减小无源滤波器的尺寸, 但并不妨碍它们通过配电网实现谐波传播, 也不防止无源滤波器与电网之间的共振现象	在该混合结构中, 串联有源滤波器作为一个在配电网与负荷间的独立部件, 一方面避免了用户电网产生的污染, 另一方面也会引起无源滤波器过充。这种结构的劣势在于串联有源滤波器的匹配变压器在一个明显的电流下运行(整个负荷电流), 因此在短路情况下, 会造成保护有源滤波器的高费用困难	在这种结构中, 有源滤波器只在谐波电流中运行, 因此提高了无源滤波器的功效。通过以下方式: ①避免放大谐波电压频率在有源滤波器反共振频率之上; ②通过降低电路的电感, 使用户与电网之间的谐波电流强烈减少。由于负载电流并不是全部通过有源滤波器, 它可以重新设定, 因此会导致消耗和权重的减少(尤其是对匹配的变压器来说)。这种结构被大力推荐于减少大功率电网和高电压的谐波污染中(中压电网)

参考文献

- [1] P. Caramia, G. Carpinelli and P. Verde, *Power Quality Indices in Liberalized Markets*, John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [2] A. Baghini (Ed.), *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [3] Carmen Golovanov *et al.* *Modern Measurement Problems in Power Systems*, Tehnică Publishing House, Bucharest, 2002 (in Romanian).
- [4] Al. Kusko and M. T. Thompson, *Power Quality in Electrical Systems*, McGraw-Hill, 2007.
- [5] R. C. Dugan *et al.*, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd edn, McGraw-Hill, 2004.
- [6] M. Eremia, *Electric Power Systems. Electric Networks*, Academiei Române Publishing House, Bucharest, 2006.
- [7] N. Golovanov, P. Postolache and C. Toader, *Power Quality and Energy Efficiency*, AGIR Publishing House, Bucharest, 2007. (in Romanian).
- [8] http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/2703
- [9] Directive 2006/32/EC on energy end-use efficiency and energy services (repealing Council Directive 93/76/EEC).
- [10] M. Bercovici, A. Aric and Al. Pocață, *Electrical Networks. Electrical Design*, Tehnică Publishing House, Bucharest, 1974. (in Romanian).
- [11] T. A. Short, *Electric Power Distribution Handbook*, CRC Press, 2004.
- [12] Z. Hanzelka, A. Bień, L. Flicker, *Power Quality Application Guide*, <http://www.lpqi.org>
- [13] UIE: Guide to quality of electrical supply for industrial installations, part 5: Flicker, WG 2, Power Quality, UIE, 1999.
- [14] T. A. Short, *Distribution Reliability and Power Quality*, Taylor & Francis, 2006.
- [15] C.-S. Wang, Flicker-insensitive light dimmer for incandescent lamps, *IEEE Tran. Ind. Electron.*, **2**(55), 2008, 767–772.
- [16] EN 61000-4-14: Voltage fluctuation immunity test.
- [17] IEC 61000-2-1: Electromagnetic compatibility – Description of the environment – Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems.
- [18] IEC 1000-2-12: Electromagnetic compatibility – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power systems.
- [19] IEC 61000-4-27: Electromagnetic compatibility – Testing and measurement techniques – Unbalance, immunity test.
- [20] IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility – Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.
- [21] EN 50160-2009: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution system.
- [22] IEC 61000-2-5: Electromagnetic compatibility – Classification of electromagnetic environments.
- [23] UIE: UIE Guide to quality of electrical supply for industrial installations, part 4: Voltage unbalance, WG 2, Power Quality, UIE, 1996.
- [24] Z. Hanzelka and A. Bien, *Harmonics – Interharmonics*, Leonardo Power Quality Application Guide, <http://www.lpqi.org>
- [25] Z. Kowalski, *Asymmetry in Power Systems* (in Polish), PWN, Warsaw, 1987.
- [26] A. Arie, E. Neguș, C. Golovanov and N. Golovanov, *Pollution Power Systems Operated Unsymmetrical Conditions*, Academiei Române Publishing House, 1994. (in Romanian).
- [27] M. Chindriș *et al.*, *Harmonic Mitigation of Industrial Distribution Networks*, Mediamira Publishing House, Cluj-Napoca, 1999. (in Romanian).
- [28] IEEE 519-92: IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems.
- [29] IEEE 1159: Recommended practice for monitoring electric power quality.
- [30] S. Gheorghe *et al.*, *Power Quality Monitoring*, Macarie Publishing House, Targoviste, 2001. (in Romanian).

深入阅读材料

- J. Arrilaga, N. R. Watson and S. Chen, *Power System Quality Assessment*, John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- M. Bollen and I. Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- EN 61000-2-4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.
- EN 1000-3-3: Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and not subject to conditional connection.
- ER P28 Electricity Association Eng. Recommendation P28: Planning limits for voltage fluctuation caused by industrial, commercial and domestic equipment in the United Kingdom, 1989.
- EURELECTRIC: Electromagnetic compatibility in European electricity supply networks, EMC & Harmonics, August 2001, Ref: 2001-2780-0020, EURELECTRIC.
- A. Ghosh and G. Ledwich, *Power Quality Enhancement using Custom Power Devices*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- IEC 50 (161): International Vocabulary (IEV) – Electromagnetic compatibility.
- A. Johansson and M. Sandström, *Sensitivity of the Human Visual System to Amplitude Modulated Light*, ISSN 1401-2928, <http://www.arbetslivsinstitut.se>
- http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_9/6.html
- Z. Kowalski, *Voltage Fluctuations in Power Systems*, (in Polish), WNT, Warsaw, 1985.
- C. M. Lefebvre, *Electric Power: Generation, Transmission and Efficiency*, Nova Science Publishers, New York, 2007.
- D. Povh and M. Weinhold, Improvement of power quality by power electronic equipment, *CIGRE Session 2000*, 13(14), Paper 36–06.
- A. Robert J. Marquett, Assessing voltage quality with relation to harmonics, flicker and unbalance, *CIGRE*, 1992.
- UIE: Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 1: General introduction to electromagnetic compatibility (EMC), types of disturbances and relevant standards, WG 2, Power Quality, UIE, 1994.
- UIE: Guide to quality of electrical supply for industrial installations, part 3: Harmonics, WG 2, Power Quality, UIE, 1995.

第 6 章 现场发电和微电网

Irena Wasiak 和 Zbigniew Hanzelka

如今，依靠着燃烧化石燃料集中发电的传统电能系统面临各种挑战。这些挑战涉及确保能源需求的能量、效率和对环境的关注。

时下开采的化石燃料资源有限，而且开发新的资源可能昂贵且技术困难。此外，从这些化石燃料能源中提炼出来的能源产品导致越来越多的气体排放，这些气体将带来环境污染。减少有害气体排放意味着增加发电成本，不扩大现存的发电机容量，就不能满足未来能量需求。

集中的能量生产需要大量、复杂的网络来把能量传送给分散的用户，投资和维护的费用很高，并且由于在网络中相对高的能量损失，能量效率降低了。一方面，现存的能量系统基础设施（输电网络）越来越落后；另一方面，建设新的组件会产生环境问题，主要是高电压输电线（例如缺少空间、公众反对）。系统传送方的重要问题是：能否维持供给方所提供的需求能量。用户的需要和他们所使用的敏感负荷数量均在不断增加。公共设施有责任以一种有效的可靠的方式为用户提供高质量的能源。另外一方面，我们发现不断增加的负荷正成为电磁干扰的来源。

根据欧盟的政策，最近几年，许多欧洲国家开发了特殊的供应系统和工艺^[1]，这促进了分布式发电（DG）在总的能量生产份额上的增加。发展新高压传输系统的困难（所谓的约束）促进了分布式发电的发展，而它并不需要大的发电系统来给用户传输电能。

在这些条件下，我们可以预见，安装在网络中的分布式电流（DER）的数量会持续增加。

DER 在用户的位置或者在局部的分散设备上产生能量并且给局部分配网络提供能量。安装 DER 可能会在网络操作要达到它的容量极限时推迟更新分配设备的需求。个人消费者可以在电网不可用时使用 DER 作为后备的发电源。在正常的操作条件下，DER 可能会为了所有者的利益把能量传送到主电网。能量设施拥有和使用的 DER 在分散网络中处于特殊的位置，来提供局部能量或能量和热需求。它们的容量可能相对高达 100kW ~ 1MW。独立的能量供应者拥有的 DER 分布在电网中，它们的容量在几千瓦到上百千瓦不等。

把相当多的 DER 整合到电网中可能会导致能量电网运行紧张并且使维持需要的能量品质（PQ）变得困难。DER 可能会产生干扰如电压浮动、不对称或者谐

一些 DG 技术需要电气接口来把能量转换成电网兼容的交流能量。通常使用的逆变器的微电源结构如图 6.1 所示。

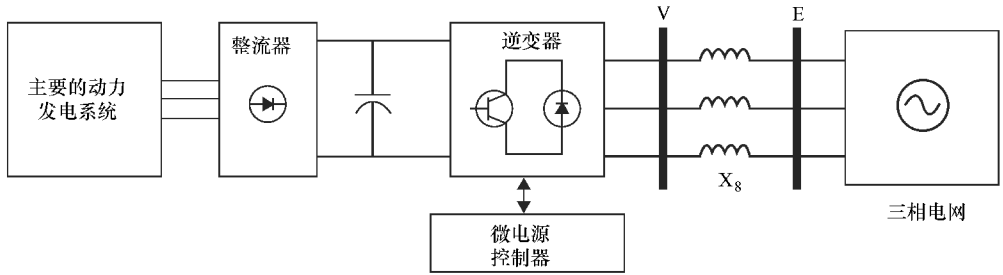


图 6.1 微电源的典型结构

对于带有交流输出的电源，例如高速微涡轮电压，首先整流产生直流输出并且变换成需要的交流电压和频率。电压源变换器提供对母线电压相位和大小的必要控制，存储可以加到直流母线上从输出上来减弱原动力。像燃料电池和光伏板这样的来源，可以直接产生直流电并且只需要一个逆变器就可以在需求的电压和频率上产生交流输出。电力电子接口也包含对于分布式能量系统和局部电力系统的保护功能，它允许在电子电力系统中的并联及断开。例如，更加详细的 DG 技术概述参见参考文献 [4-6]。

某些类型的分布式发电机也能将产生的废热转换为电能——热电联产（CHP）。

6.1.1.1 CHP

废热产生于能量转化过程。通过 CHP 生产过程（废热发电），这些废热被收集起来并且利用在空间或者过程加热，这会提高燃料转换成能量的效率。废热发电意味着在一个热能和电能的技术过程中同时发电。废热发电的效率定义为每年电力和可用热量的总和除以用于产生电力和热量输出的总和。这一效率由废热发电技术和单元的大小决定（见表 6.1），平均值到了 85%。

CHP 和分布式发电的比较如图 6.2 所示。

根据参考文献 [3]，假设以下效率用以对比：对于废热发电，电能效率为 35%，热效率是 50%（基于内燃机）；分布式发电，发电站平均效率是 43%，锅

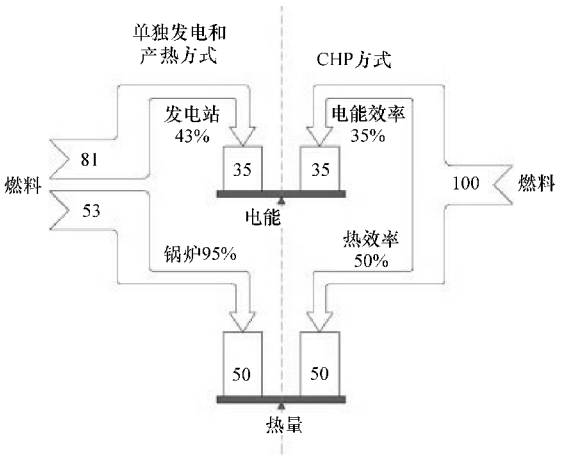


图 6.2 CHP 方式与单独发电和产热方式的比较

炉效率是95%。假设产生相同量的电能和热能，用于分布式发电机的燃料总量比CHP高25%，这意味着能量效率提高了25%。

定义废热发电效率的方法参见参考文献[7]。由废热发电带来的原始能源的节约(PES)可用下式计算：

$$PES = \left(1 - \frac{1}{\frac{\eta_{Q,CHP}}{\eta_{Q,Ref}} + \frac{\eta_{E,CHP}}{\eta_{E,Ref}}} \right) \times 100\% \quad (6.1)$$

式中 $\eta_{Q,CHP}$ 和 $\eta_{E,CHP}$ ——CHP 的热能和电能效率，记作每年的有用热能输出和每年电量分别对燃料输入的比率；

$\eta_{E,Ref}$ 和 $\eta_{Q,Ref}$ ——废热发电替代的由分布式发电系统所产生的热能和电能的效率参考值。

对于从图 6.2 中的值，算法为

$$PES = \left(1 - \frac{1}{\frac{0.5}{0.95} + \frac{0.35}{0.43}} \right) \times 100\% = 25.4\% \quad (6.2)$$

计算效率参考值时要考虑到燃料种类。在今年的 CHP 建设中，CHP 单元的热能和电能的生产与市场上经济合理的技术相比是最优的。

CHP 相比于分布式发电所产生的热能和电能的参考值至少节约了 10%，属于高效的回集废热系统。由小范围和能带来原始能源节约的微小废热发电单元所产生的能源产品将被视为高效 CHP。

CHP 系统同时为用户提供所需的电能和热能。典型地，由于传输热能相比传输电能要困难得多，CHP 单元被安装在接近热负载的地方。不同的 CHP 技术应用用于不同的领域。我们把最大容量低于 50kW 的 CHP 单元归类于“微废热发电系统”，安装容量低于 1MW 的单元归类于“小规模废热发电系统”^[7]。在工厂中这一应用很广泛，因为那里热量需求通常伴随着能量需求。小 CHP 单元在满足热负载需求上有很好的适应性，因此在最近几年，废热发电也受到商业用户和居住用户的青睐。应用于空间加热的热量通常需要相对较低温度，然而用于过程加热的热量则需要高一点的温度。

从实用的角度来看，国内 CHP 的优势在于它能减少峰值时的负荷。通常，电能需求高峰发生在冬季，此时热量需求是最大的。但是，在那些夏季很热的国家，夏季峰值负载与冬季峰值负载相同甚至高于冬季峰值负载。使用 CHP 系统为大楼的冷却系统供电也能降低峰值电力负荷^[8]。

效率的提高是 CHP 系统所能带来的好处中最重要的。欧盟委员会支持并促进这一技术的发展，我们可以期待，在整个电能生产中废热发电的份额将会不断增加。

6.1.2 能量储存

电能的储存是目前电力工程的一大挑战。它的目标是通过满足能量需求来提高

发电效率，优化管理传输分配系统和提高电路传输能力。能量储存系统的关键驱动者是分布式能源逐渐增长的知名度及它们的特殊位置，其通常远离公共网络，能量的产出通常与需求无关并且可以在一个大范围中变化，且具有低水平的能量容量（0.2 风力发电，0.1 光伏发电），依旧高的能量花费和相对低效率的集中发电。

根据单位能源和需要的时间，能量储存问题可以分成两类：能量提供品质——主要在电压下降和短时供应中断时为用户提供能量保护，即所谓的后备储存能量供应（BSES）以及能量管理。后者需要相当多的能量和更长的自治时间（见图 6.3）。

在实用方面，储存单元应当有大的容量（几十兆瓦），并且储存时间能从分钟到小时——依据情况而定。在终端用户使用方面，储存单元的容量可以低一些（从几十至几百千瓦），但是储存时间则要更长。

根据能量释放率，可以将分散网络中所使用的设备分成 3 类^[9,10]：

- 1) 在秒级或更短时间内提供能量来满足附属功能（包括 PQ 事件补偿）的系统。
- 2) 在分钟级提供能量来弥补电压不足（不间断供电）的系统；
- 3) 几分钟甚至小时内提供能量、去峰值和能量管理，包括独立操作的系统。

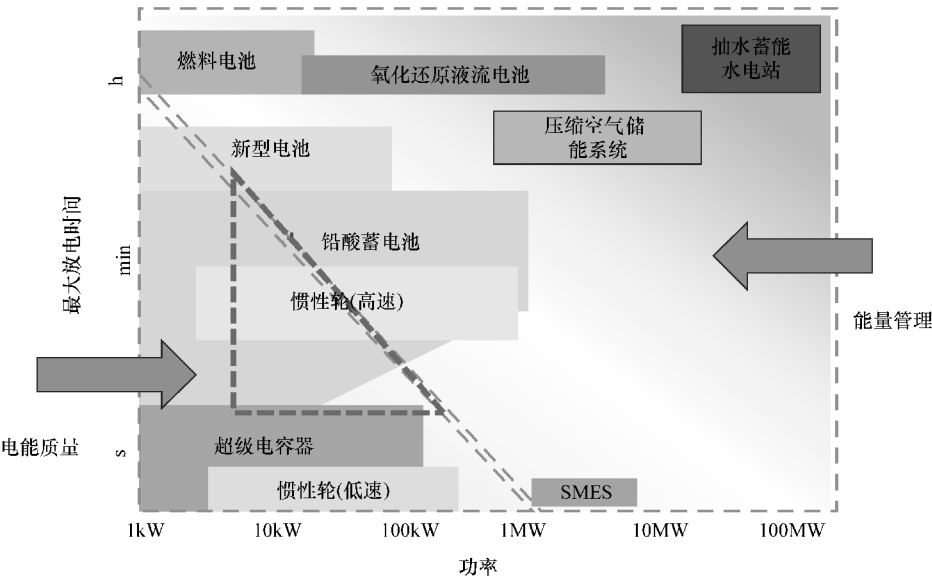


图 6.3 特定能源储存系统的自维持放电时间和功率（基于参考文献 [6, 11]）

有许多技术使得能量储存成为可能^[10]。人们使用最普遍的是储存成本低和效率高的高压水泵。其他的技术在现如今只是小规模，或在特殊条件下使用的，例如惯性轮（需要大功率但是不需要大量的能量时使用）。（在柴油发电机可用之前通过应急功率供给来满足能源需求，一般时间不会超过 1min）被指定为长期储存系统的是

高压水泵、压缩空气、储存氢、电池（包括氧化还原液流电池）和热能储存。惯性轮、超导线圈和超级电容器（和一些电池）是通常用来储存少量能量的设备，但是它们能够用于大功率充放电，再加上它们较好的动态性能（如反应时间）使它们非常符合能量品质规则。未来市场的主要挑战源于应用方面，例如电动汽车或插件混合动力汽车以及电网耦合光伏系统，它们用于满足应用并支持电网。表 6.2 和表 6.3 总结了能量储存方法。

表 6.2 直接能源储存系统比较^[6,11-13]

	缺点	优点
在磁场环境—— 超导储能 (SMES)	● 高成本和严格的安全要求，有热稳定性的损失和线圈损坏的威胁 ● 运营和维护成本高，大型辅机，保持低温的冷却系统复杂，并由此产生额外的功率损耗 ● 比能低 ● 具体损失：c. 30 ~ 40W/Wh ● 非常强大的磁场可能会造成危害（对生物体） ● 充电时间：min - h	● 最大功率为 1 ~ 100MW，500MJ ● 高功率密度 Wh/kg：30 ~ 100 ● 服务时间长达 30 年 ● 在额定功率下的放电时间：s min ● 环保，可回收 ● 快速反应时间（ms） ● 充电时间非常短，从完全放电状态开始少于 90s ● 比相同功率的电池组需要更少的空间 ● 效率（充电/放电）：85% ~ 98% ● 技术准备水平的原型（处于研究阶段） ● 非常强大，支持技术开发，主要应用领域：RES、SR、T&D^①
在电场环境—— 超级电容器 (超级电容器 或双电层电 容器) —— SC	● 技术昂贵 ● 比能低：1 ~ 10Wh/kg ● 低电池电压——实现更高的电压需要串联，大量串联的电容器需要电压平衡 ● 需要先进的电力电子器件 ● 在放电过程中电压降低	● 功率系数高（10000W/kg），额定功率：0.01 ~ 100kW，10MJ ● 比电池轻 ● 自我放电过程很慢 ● 效率（充电/放电）：85% ~ 98%，具体损失：0.026W/Wh ● 低温下可操作，甚至 -40℃ ● 充电方法简单——没有完全充电时需要检测；没有过度充电的危险，充电/放电时间很短，0.3 ~ 30s ● 低阻抗——电池并行放着以提高负荷处理 ● 近乎无限的循环寿命，免维护（超过 500000 次的充电/放电） ● 强力支持技术开发，主要应用领域：RES，SR^①

① RES—可再生能源；SR—RES 的支持；G&SR—发电和系统储存；T&D—传输和配电的支持；UPS—不间断电源系统。

有一些技术对于它们应用的领域来说是很典型的。在能量管理应用方面，对于放电时间大于 1.25h 的，应用铅酸蓄电池是最经济的^[9]。其他技术如镍镉电池、钠硫电池或锂离子电池在循环寿命和效率方面，可以提供更好的表现，但是它们的成本很高，目前仍处于发展阶段。

超级电容器和惯性轮能量储存对于大功率应用场合很适用。在 PQ 应用下，超级电容器引起了很多人的关注^[14,15]。

表 6.3 间接能源储存系统比较^[6,11-13]

		缺点	优点
机械性的	抽水蓄能水力发电厂	• 安装位置在地理和地质上受限制 • 成本高 • 建设时间长 • 大型电力系统专用 (0.1 ~ 1GW)	• 成熟的技术——运用于电力行业已有很长一段时间 • 运行相对便宜 • 额定功率下的放电时间：h - d • 效率（充电/放电）：65% ~ 80% • 服务时间：30 ~ 50 年 • 主要应用领域：RES、G&SR^①
	动能储存系统	• 比能低 (2000 ~ 10000Wh/kg) • 空载损耗高	• 成熟的技术——批量生产 • 功率系数高 • 额定功率：0.01 ~ 10MW, 15MJ • 额定功率下的放电时间：s - min • 效率（充电/放电）：90% • 具体损失：低速：2000 ~ 10000r/min - 2.2W/Wh；高速：10000 ~ 1000000r/min - 1.2W/Wh • 服务时间：c. 20 年 • 强力支持技术开发，具有相当大的应用潜力，主要应用领域：RES、SR^①
	压缩空气能源储存（绝热 CAES）	• 安装位置在地理和地质上受限制 • 成本高 • 建设时间长 • 大型装置专用 • 启动时间长，分布式能源兼容性差	• 成熟的技术 • 高比能和功率系数 • 额定功率：0.1 ~ 1GW • 额定功率下的放电时间：h - d • 效率（充电/放电）：60% • 服务时间：20 ~ 40 年 • 支持技术开发，主要应用领域：RES、G&SR^①

(续)

		缺点	优点
电 化 学	电池—— SB	燃料电池 (各种技术)	• 技术昂贵 (催化剂昂贵) • 燃料生产困难 (氢) • 没有电流过载能力 • 比能: c. 11000Wh/kg • 为未来发展提供强有力的成熟的技术支持 (批量生产) • 额定功率: 达到 5MW • 效率 (充电/放电): 40% ~ 55% • CHP 能力 (高温燃料电池) • 额定功率下的放电时间: min – h • 服务时间: 20 ~ 30 年 • 主要应用领域: RES、SR、G&SR、T&D 和 UPS
		铅酸蓄电池	• 特定功率: 1000W/kg • 比能: c. 10 ~ 100Wh/kg • 充电/放电循环次数有限 • 有限的工作电压和电流 • 需要维修和技术监控 • 电池容量取决于温度 • 深度放电电压高 • 循环利用昂贵 • 效率: c. 80% • 成熟的、现成的技术, 丰富的生产和运营经验 • 服务时间长: 10 ~ 20 年 • 价格低 • 易于生产 • 模块化结构, 大小适中 • 可安装大型发电装置, 达到 10MW, 超过 600MJ • 合适的电压特性 • 充电时间: h; 放电时间: min – h • 具体损失: 0.023W/Wh • 效率 (充电/放电): c. 70% ~ 85% (涉及所有电池储能技术) • 主要应用领域: RES、SR、G&SR、T&D 和 UPS
		钠硫 (Na – S) 或氯化 镍钠 (NaNiCl) 电池	• 技术昂贵, 钠多硫化物是极具侵略性的, 容器必须镀铬和钼 (两者都很贵) • 工作温度高, 需要必要的保温和温度监测, 陶瓷电解质对热循环敏感 • 成熟的技术 • 功率达到 8MW, 60MWh • 功率和能量密度大 • 效率: 70% ~ 80% • 电极材料便宜 • 应用领域: RES、SR、G&SR、T&D 和 UPS
		氧化还原液 流电池 (钒) (VRB)	• 处在发展阶段且成本非常高的技术 • 不同的标准 • 运用于大型应用程序 (1MW – 1h; 3MW – 1.5s) • 功率和能量密度高 • 效率: 60% ~ 75% • 开发技术支持强大, 具有相当大的应用潜力

(续)

		缺点	优点	
电 化 学	电 池—— SB	锌溴电池 (Zn – Br)	• 处在发展阶段且成本非常高的技术 • 运行成本高 • 含有腐蚀性和有毒物质	• 功率和能量密度高 • 运用于大型应用程序 • 效率：70% ~80%
		锂离子电池	• 处在发展阶段且成本非常高的技术，并且“难”操作，不稳定的锂在空气存在下会产生电池失效的危险，特别是在便携式设备中 • 服务时间短	• 功率和能量密度高 • 效率：90% ~95% • 需要最少的维护 • 尺寸和重量小
		镍镉 (Ni – Cd) 蓄电池	• 技术昂贵 • 含有有毒物质（镉） • 自放电速度快（尤其在高温下） • 高温下充电限制容量 • 运用于低功耗系统	• 成熟的技术 • 机械强度高 • 能量密度高 • 效率：60% ~70% • 允许高充电电流 • 服务时间长（长达 25 年） • 环境温度对电池容量的影响不显著 • 大量的深度放电 • 放电状态下可以用推荐的电池进行储存
		镍金属 氢化物 (Ni – M – H)	• 技术昂贵 • 对高温敏感，和镍镉蓄电池相似 • 回收过程困难	• 成熟的技术 • 效率：80% ~90% • 机械强度高 • 能量密度高 • 服务时间长 • 和镍镉蓄电池相比，有毒化合物含量较少

① RES—可再生能源；SR—RES 的支持；G&SR—发电和系统储存；T&D—传输和配电的支持；UPS—不间断电源系统。

6.2 DG 在分布式电网中能源损耗的影响

在分布式电网中的有功功率损耗取决于有功和无功流：

$$\Delta P = 3I^2 R = 3 \left(\frac{S}{\sqrt{3}U} \right)^2 R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R \quad (6.3)$$

在图 6.4 中和电网中的与 k 节点相连的资源介绍了有功功率 P_k 和无功功率 Q_k ，电网中的电流将发生变化。在 α ($\alpha-1, \alpha$) 分支中的有功功率等于：

$$P_{\alpha-i, \alpha} = \sum_{i=\alpha}^{k-1} P_i - P_k + P_{k+1} \quad (6.4)$$

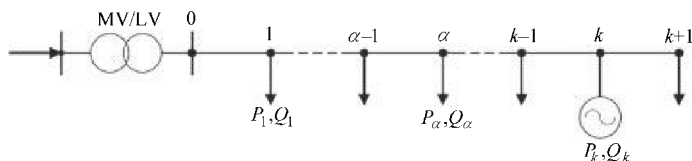


图 6.4 低压 (LV) 电网电源连接示例

无功功率等于：

$$Q_{\alpha-i, \alpha} = \sum_{i=\alpha}^{k-1} Q_i \pm Q_k + Q_{k+1} \quad (6.5)$$

在这些电源连接后，网络中的总损耗：

$$\Delta P_{T(s)} = \frac{1}{U_n^2} \sum_{\alpha=1}^{k+1} [R_{\alpha-1, \alpha} (P_{\alpha-1, \alpha}^2 + Q_{\alpha-1, \alpha}^2)] \quad (6.6)$$

其中

$$\begin{aligned} P_{\alpha-1, \alpha} &= \sum_{i=\alpha}^{k-1} P_i - P_k + P_{k+1} & \alpha \leq k-1 \\ P_{k-1, k} &= P_{k+1} - P_k \\ P_{k, k+1} &= P_{k+1} \end{aligned}$$

并且

$$\begin{aligned} Q_{\alpha-1, \alpha} &= \sum_{i=\alpha}^{k-1} Q_i \pm Q_k + Q_{k+1} & \alpha \leq k-1 \\ Q_{k-1, k} &= Q_{k+1} \pm Q_k \\ Q_{k, k+1} &= Q_{k+1} \end{aligned}$$

总体来说，一个电源可以产生或者消耗无功功率，然而在大多数实际案例中，有源无功功率等于零。在这样的假设下，将电源接入电网中将会影响损耗的有功功率成分。在引入 P_k 有功功率到节点 k 后，支流的有功功率损耗的区别：

$$\delta(\Delta P_T) = \Delta P_{T(s)} - \Delta P_T = \frac{1}{U_n^2} \sum_{\alpha=1}^{k+1} [R_{\alpha-1, \alpha} (P_{\alpha-1, \alpha}^2 - P_{0(\alpha-1, \alpha)}^2)] \quad (6.7)$$

式中 $P_{0(\alpha-1, \alpha)}$ ——当 $P_k=0$ 时，流经支流 $(\alpha-1, \alpha)$ 中的有功功率。

如果 $\delta(\Delta P_T) < 0$ ，电网中的损耗将会减少。

通常来说，能源满足当地的负荷需求。这对于供电电网来说是一个缓解。对于大多数的支流来说，损耗也减少了。然而，如果电源相对大，在损耗中的减少也许不会发生。

让我们讨论一下简单的如图 6.5 所示的三节点支流。在将电源连接到节点 2 后，在支流中的有功流量将是

$$P_{12} = P_3 - P_2 \quad (6.8)$$

$$P_{01} = P_1 + P_3 - P_2$$

在支流中的有功损耗的区别是

$$\delta(\Delta P_T) = \frac{R_{01}}{U_n^2} [P_2^2 - 2P_2(P_1 + P_3)] + \frac{R_{12}}{U_n^2} (P_2^2 - 2P_2P_3) \quad (6.9)$$

假设 R_{01} 等于 R_{12} ， $\delta(\Delta P_T) < 0$ ，如果

$$0 < P_2 < P_1 + 2P_3 \quad (6.10)$$

在功率损耗中的作为由电源造成的源函数的改变已经呈现在图 6.6 中。功率损耗 ΔP_T 表示为与 ΔP_{T0} 有关的值， ΔP_{T0} 由 $P_2 = 0$ 得到。电源功率 P_2 被认为是负荷功率 $P_1 + P_3$ 的总和。以下数据将为支流假设：线性普通电压 $U_n = 0.4 \text{ kV}$ ，线截面积 $s_{01} = s_{12} = s_{23} = 35 \text{ mm}^2$ ，线导电性 $\gamma = 34 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$ ，支流部分的长度为 $l_{01} = l_{12} = l_{23} = 500 \text{ m}$ 。负荷消耗了定值的无功功率 $\tan \varphi_1 = \tan \varphi_3 = 0.4$ ，有源无功功率等于 0。

从图 6.6 中可以很清楚地得出功率损耗的范围取决于当地负荷的位置和它们的功率。支流终端的负荷越大，由支流损失减少的电源产生的电压范围也就越大，从而也会减少得越多。如果总的负荷功率位于节点 1，只有当电源没有超过负荷功率时，损耗才会减少。在这种情况下，网络只提供无功功率。另一方面，如果总的负荷功率都位于节点 3，损耗的减少将会出现在产生功率中，数值从 0 到 2 倍的总负荷功率。对于每一个单独的案例来说，我们可以确定出在支流中给出最小损耗的源动力。

相似的分析可以在不同的支流数据上分析出，并且支流长度和横截面积的影响可以很容易确定。对于每一个负荷案例和电源来说，选择让支路操作最有效的最优的电源位置是可能的。对大型的分布式电网来说，应用不同的最优化方案，以至于可以允许人们决定一个最优化的 DG 的分配，以达到最小化功率损耗并且保持电压分布和可靠性等级在要求范围内^[16]。

在实际上，一个单一电源的连接不会造成损耗上大量减少。然而在微电网中，许多电源都被连接起来的情况下，损耗大量减少这一效果就很明显了。参考文献

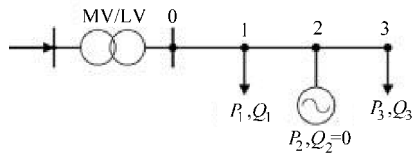


图 6.5 三节点支流电网示例

[17] 给出了这方面的研究结果。它显示在峰值需求发生在夏天的国家，光伏发电在一些分布式电网中损耗的减少高达 40%。相同的效果在峰值需求发生在冬天夜晚和 CHP 应用于电网的情况下可以获得。

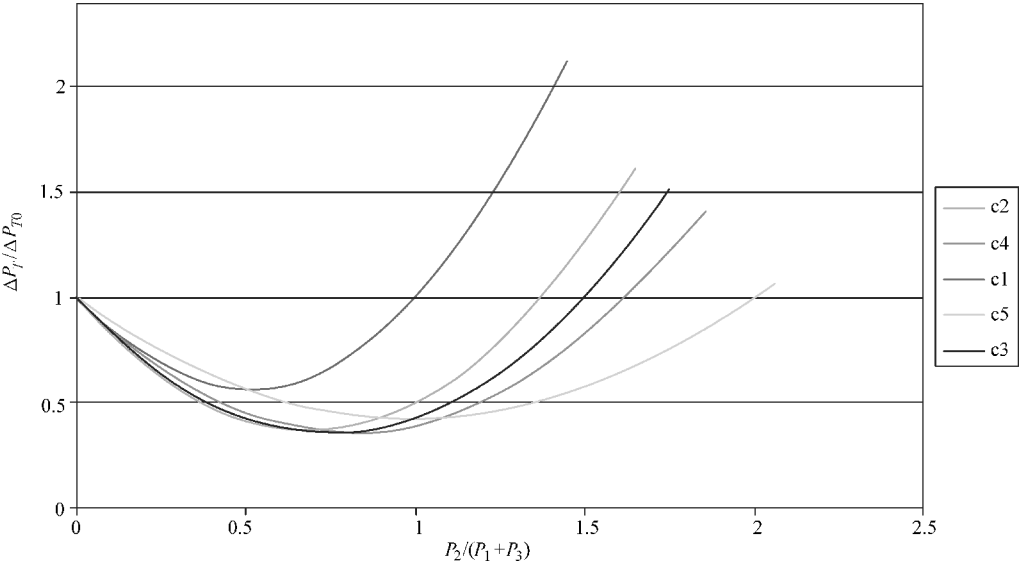


图 6.6 图 6.5 所示支流电网的能量损耗变化规律：c1 - $P_1 = 80\text{kW}$, $P_3 = 0\text{kW}$ ；c2 - $P_1 = 50\text{kW}$, $P_3 = 30\text{kW}$ ；c3 - $P_1 = 40\text{kW}$ ； $P_3 = 40\text{kW}$ ；c4 - $P_1 = 30\text{kW}$, $P_3 = 50\text{kW}$ ；c5 - $P_1 = 0\text{kW}$, $P_3 = 80\text{kW}$

6.3 微电网

6.3.1 概念

在 DER 应用增长的环境下，传统的分布式电网改变着它们的结构，从无源变为了有源。有源网络中，电能的生产、分配和使用以一种可控的方式实施着，从而组成了微电网。

微电网整合了包括可再生能源、储存系统、可控和不可控负荷在内的能源。能源主要在当地负荷需求上产生电能和热能。储能设备支持了变化的电力操作，并且为了获得最优化的经济利益，储能设备也用于维持能源平衡中。其他的“传统能源”设备也许会被应用于提高支持量和系统的稳定性上。微电网的操作被控制系统实时监测和监督，这在微电网的概念中是一个关键的问题，它可以决定微电网的智能程度。实时监测使得这一电网具有可观测的特点，所测得数据被传送到管理和决策中心。智能预言和决策制定算法使得这些数据可以预测现存的结果，并

且做出在给定标准下最优的决定。

所以，有特点的微电网就是智能电网。它在欧洲技术平台更广泛的意义上被定义为“一个可以智能化地整合和它有关的所有用户的行动——生产者、消费者和生产消费者——为了有效地传输可持续的、经济的、安全的电能供给”。这个定义不局限于任何电压等级，然而微电网只涉及 LV 电网。微电网如图 6.7 所示。

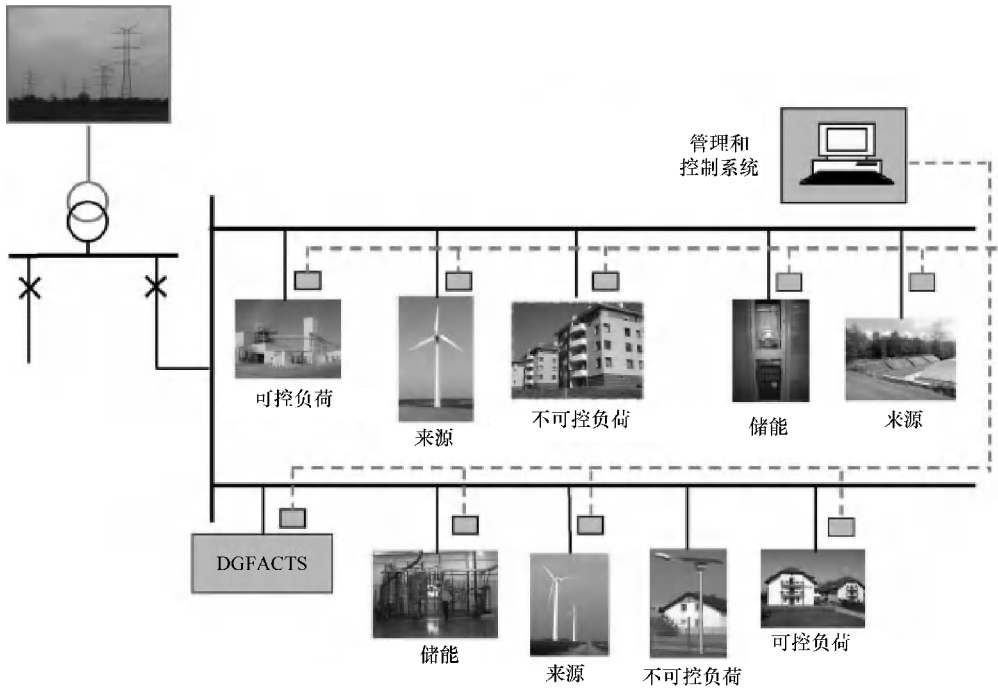


图 6.7 低压（LV）微电网示意图

一些文献提及许多和微电网的发展有关的研究学习和展示活动。参考文献 [18] 综合阐述了一个正在欧洲、日本、美国和加拿大进行的项目。

微电网是由多条通过配电站提供的支流所组成的，这是它的基本结构，这些支流可以成为配电系统的一部分或者是一座大楼的电力系统。一个静态开关通常将微电网和配电站的 LV 母线相连接。通常，微系统连接着电网工作，但是自主的操作和这两个模式^[19-21]之间也是可以转换的。在电网相连的模式里，由微电网产出的多余的电能可以被卖给公共设备，在这种情况下，微电网将会参与市场的运作或提供辅助性的服务^[22]。孤岛运行的转化遵循着在故障情况下与电网连接的损失。这些在网络连接恢复之前一直持续地自主操作，将会有部分或全部的能量传递给消费者。其中有着国际间长时间的孤岛操作，时间的长度和所提供的负荷的范围是通用

的。控制和保护所要求的通信是微电网建设中的重要成分。如互联网、雷达通信、电力线载波通信和电话通信等多种技术都可以应用到微电网的建设中。这些工作在标准通信协议的建立下可以继续使用。

世界上现存的微电网测试网络在参考文献[21, 23]中有所介绍。该测试系统包括所有现存重要技术, 比如光伏、微型涡轮、风力机、燃料电池。参考文献[20, 21]中给出了关于微电网标准的信息和技术。经济 and 规定性的问题是参考文献[8]所关注的。计划和设计部分在参考文献[4]中有所涉及。

微电网的技术和建筑提供了一个可以提高能源消耗效率的机会。建设靠近需求中心的能源设备可以减少传输和配电过程中的损耗。CHP 发电技术使得废热得到利用供给用户。能源管理控制系统和储存系统的应用使得微电网能够在最小成本下运行。最后, 定制电力设备对于负面效应和不良电能的减少有着重要的作用。

6.3.2 储能的应用

储能系统在微电网上已经有了许多的应用。储能技术可以提供那些诸如可再生能源(RES)的间断性、需求波动和电能质量等影响着微电网发展关键问题的解决方法。它们可以让公共设备和终端用户都更好地使用电能。公用应用包括: 电网、负荷等级和辅助服务的可再生能源的整合, 但是终端用户主要关注峰值负载抑制和不间断的能量供给。

6.3.2.1 可再生能源的整合

可再生能源的整合在电网的支持下, 已经做了大量的工作, 诸如风能和太阳能系统。这种系统每日产能量是随机的, 是不符合典型的需求曲线的。通常, 最高的发电时间不在用电峰值点。储能系统使我们可以保存一部分的能量并且将其转到用电峰值时。这个系统储存了在低负荷时段产生的过剩电能并且将其在高负荷时段释放。通过这种方法, 当地发电降低了电网中的峰值流动, 从而损耗也将相应减少。

从市场的角度来看, 这意味着能量在低电价的时候被储存, 在高电价时被注入电网。能源分配的益处是可以将来自电网传送中的能源储存下来满足需求。为电网提供能量的有风电场, 这也会带来经济利益。参考文献[24, 25]分析了这一应用在技术和经济上的影响。

将储能系统作为电能和能源缓冲器可以分配可再生能源产生的能量。这一应用的另一个目的是减缓电能输出波动, 从而提高能源质量。当有很多可再生能源注入电网时, 这个功能是很重要的。储存可以增加可再生能源的使用, 减少化石燃料的使用, 提高电网效率。

6.3.2.2 负荷等级

在每一个电网中，电源发电必须和能源消耗相匹配。消费者的需求根据日负荷曲线而变化。这要求电网有一个合适的容量处理它在任何运行状态下的需求波动。传统意义上，电网是由波峰功率制定的维度。调查结果显示，通过线路传输的电能作为总的电能容量在波峰时所需要的部分不超过 68%^[26]。能源储存系统可以提供平衡服务，减少峰值负荷在电网上的压力，并且保持电能在低等级上通过电网传输。它允许其中一个区标出电网的尺寸以满足需求功率的较低值。

电网由于能源需求增大而造成过载时，能源储存可以缓解这种问题并且可以提高电网的稳定性和可靠性。从经济的角度来看，这意味着当我们忽略延迟或者忽略电网加强投资时，现存的电网有了一定的发展。

6.3.2.3 辅助服务

辅助服务应用考虑到通过联轴器、逆变器和电网相连接的储能系统。这种服务在技术上可行，虽然还没有得到广泛应用，但是对未来的微电网来说已经充分显示了它的潜在发展空间。

典型的逆变器的控制策略假设了两个目标：

- 1) 依据能源管理系统（充电和放电策略）的有功功率的产生和消耗；
- 2) 由扰动负荷或者故障事件造成的 PQ 现象的补偿。

PQ 控制可以包括：

- 1) 由负荷引入电网中扰动补偿——电压幅度变化、谐波、闪烁、不平衡；
- 2) 来自电网中的电压平缓下降。

由单元展示的特殊任务取决于它的运行模式。

在当前的用于假设负荷补偿的控制模式下，逆变器必须向电网中注入电流以保证负荷电流的扰动（如谐波、反序列、逆序列）可以被消除，使电网中的电流变为一个基础的谐波和正序列。与此同时，逆变器需要产生和消耗有功功率以满足管理系统的要求，这使得电压稳固在节点处成为可能。为了稳固这个电压，逆变器必须注入一个基础频率下的正序的无功电流，这也将供能网络的电抗上造成一定的电压降。

6.3.2.4 峰值负荷抑制

在许多国家，波峰和波谷的电价有很大的区别。在波峰时电价更高，终端用户也许会对降低他们在这一时间里的用电量，而在这一时间段他们可以使用储存的电能。储能电源在电价较低的非波峰时间充电，并在波峰时放电给负荷。对于同时依据于能源消耗和最高功率需求下充电的工业用户来说，波峰功率需求的减少意味着减少需求价值。这一应用对有着很高的波峰对波谷需求比的用户来说是非常有用的，尤其是在波峰和波谷能源价格有着很大区别的地方。

6.3.3 管理和控制

微电网建设中的关键问题还包括管理和控制系统。它将会协调优化变化能源和负荷的操作并且在没有重新对电网本身进行设计的情况下将分配资源整合到电网中去^[27]。

这个系统遵循以下要求^[22,28,29]：

- 1) 利用设备优化当地资源的生产和电力变化；
- 2) 确保能源的合理运用满足操作限制；
- 3) 通过储存增加系统的稳定性和效率；
- 4) 最优化热能的使用；
- 5) 确保不间断提供感性负荷。

这个系统也会平缓转换微电网从电网连接到孤岛运行，并且监督它在孤岛模式下的运行^[28]。

最优的功率分配方案是建立在提供负荷所需功率的电产能量的总损耗最小化上的。负荷曲线和可再生能源的产量都可以从每日预测中得出。数学上说，这个问题是在给定限制下的多目标最优化：为能源供给设备工作在使电力生产总损耗最小的环境。这个目标函数可能包括以下4个部分：

- 1) 对于每个可控的单位来说，燃料消耗率、操作和维护价值、启动价值；
- 2) 与供电电网进行电路交换的成本；
- 3) 环境排放成本；
- 4) 当违背边界条件时的罚款成本。

客观限制包括：

- 1) 功率平衡；
- 2) 发电容量限制、最小上/下时限、最大启动/停止数量限制；
- 3) 为线路和变压器的负荷所带的容量；
- 4) 电网节点的电压限制。

相关文献记载了不同形式的目标函数在不同的微电网建设中的应用。参考文献[30-32]提到了发电排放对环境的影响。假设可再生资源工作在最大转换效率，并且它们被认为是负序负荷。在参考文献[31,32]中，考虑了能源储存，这用于储存产生的多余能源来支持可再生能源的运行。储存的充电状态被监控着，而且考虑了能源平衡中的储存能量。在有着热能需求的微电网中，最优化涉及电能和热能的产生^[33-36]。如果储存系统包括在最优化中，储能为一个新增的变量，并且划入在指定时间范围内的总能源消耗的最小值，这是因为在任何时间段的储存操作影响着它在接下来时间段里的操作。在这种情况下，可以控制储存的放电和充电模式^[34,35,37]。

微电网的概念也假设需求面的控制，这是一个非常重要的特点。但是在实际中，还没有应用到传统的电网中，它需要智能测量和可控负荷设备安装在用户端。可控负荷设备可以加入到需求回应控制策略中，通过能源管理控制器进行执行和监督，来减少峰值负荷并且平衡负荷轮廓^[19]。需求面控制也可以通过个人用户实现，一旦用户收到能源消费信息，他们可以控制负荷使得能源消耗最小化。通过这种方式，积极地需求可以通过消费者和公共设备的互动获得。通过需求面管理（DSM）达到的峰值负荷的减少给增加可靠且有效的能源带来了好处。DSM 用于控制电能和热能的消费^[4]，并且对终端用户和公共设备有益。

控制策略可以是分散的也可以是集中的^[19,22]。集中控制方案是等级制的，而且包括最优化微电网操作、发电机的本地控制、负荷和储能的中央管理。中央控制器提供了当地控制的设定点。它的结构通常包括不同功能的模块。参考文献 [34, 37, 38] 提到了 3 个模块：预测、经济最优化和在线控制。第一个模块中，负荷剖面和可再生能源产生预测提前给出。第二个模块决定着基于预测的全部控制设备的设定点。在线控制模块以调整电源的操作点来维持功率平衡和实时操作时所需的能源质量。当地控制器遵循着中央控制器的指令，并且控制着资源和负荷的操作点。当地控制器的所测数据是当地的电压和电流。

当微电源和负荷的目标一致时，集中控制的使用对于小范围微电网来说是有益的^[22]。

分散控制（也称为自动控制^[19,22,30]）也被运用在微电网中，它受不同组织的控制且运行在不同的市场环境中。如果当地的微电网除了供电外还有其他任务（比如提供热能或稳定电压或者为当地临界负荷提供支持等），应用分散控制是比较适合的^[22]。在这种情况下，每个参与的单元可以自主动作。因而提出了一种多媒介系统来解决这个问题^[18,39]。

迄今为止，大多数方法假设一个等级类型，两种级别的管理和控制方案：中央能源管理和个体单位的当地能源与电压控制^[40]。然而，基于多媒介的途径是为了未来智能电网提出的^[23,41]。

分离问题涉及微电网控制下的孤岛操作^[40]。这包括维护孤岛负荷的合适负荷和电压频率。能源必须遵循负荷时间历程，因此发电和负荷管理非常重要。为了平衡发电和消耗功率，在发电和负荷端可使用多种技术（减荷）。

微电网的管理和控制是目前广泛研究的主题。它是能源节约领域中极具挑战性的选择。根据参考文献 [35, 41]，通过最优操作和为楼宇供电的微电网的管理，大约可节约 20% ~ 30% 的建筑能耗。通过将微电网视为一个可以提供用户电能、热能的整合能源系统，可以确定最优的微电网结构和电源的技术。其目标就是用最小的成本满足用户的需求。使用这种技术设计微电网的研究正在进行，并且在参考

文献 [17, 33, 35] 中举出了一些实例。控制策略的发展史是面向微电网方向的系统设计的实际转换的关键问题^[4]。

6.3.4 微电网中的电能质量和可靠性

维持高等级的供电质量是微电网中的一个任务。高质量的电能是用户所需求的, 并且它对能源效率的提升很有帮助。能源质量控制包括控制可再生能源产生电能的稳定性和稳定电网中的扰动。这些扰动对电能质量是不利的。传统上来说, 多余的“耗能”设备已经被用于电磁扰动的缓和及电能质量的提升。诸如 DSTATCOM 或者 APF 系统补偿设备, 在配电网络中就像 FACUS 在传输网中所做的那样, 起到了相似的作用, 因此它们被称为“DGFACTS”。

通过额外增加设备提升能源质量是相当高效的, 因此安装新的设备的决定应该基于细节成本最优化分析。用户的需求不同, 有的需要很高的能源质量, 而其他的则不需要。由于能源质量是由当地控制的, 能源质量等级可以被定做得更准确以满足终端用户的需求。依据参考文献 [17], 这将会有可观的收益。

有着分布式发电的电网为操作者提供新的可能性和解决方案。一些 DER 用电力电子接口将获得的能源转化为兼容电网的交流电源。这些转换器可以用来完成和电力补偿器相似的任务。电网耦合变换器的基本任务是将有功功率转化到电网中。它的其他功能被称作辅助服务。DER 的独特作用是提高微电网的电能质量和能源效率^[21]。

图 6.8 阐述了一个连接着提供辅助服务的电源逆变器的可执行操作。在这个例子中, 系统补偿了无功功率和负荷的不平衡。在 0.5s 内, 有功功率设定值从 50kW 降到了 30kW (负荷功率恒定), 接着, 在 1.25s 内, 负荷功率在每一项里成比例地减少了 30% (见图 6.8a)。无功功率随着负荷功率 (定功率系数) 的改变而改变, 以保持电网中的无功功率传输稳定。同时, 系统完成当前补偿的任务, 荷载和电网电流被呈现在了图 6.8b 中。

除了与 DG 整合有关的多种技术问题以外, 在微电网发展前应考虑一些非技术性问题。他们考虑到监管问题、价格、决定优先权、责任制和激励。

比如说, 需要改变现存规则里利用微电网的自主动作。这也需要 DES 可以在供电网发生任何扰动的情况下检错。进一步说, 对于不同的控制 DER 的人来说, 这个问题就是谁将负责去控制微电网的操作。或者需要怎样的激励使 DER 的所有者想要把 DER 应用于控制或者辅助服务。

微电网的实际应用是一个具有挑战性的任务, 并且需要进一步的研究和策略层面的改变去完全开发潜在的利益。

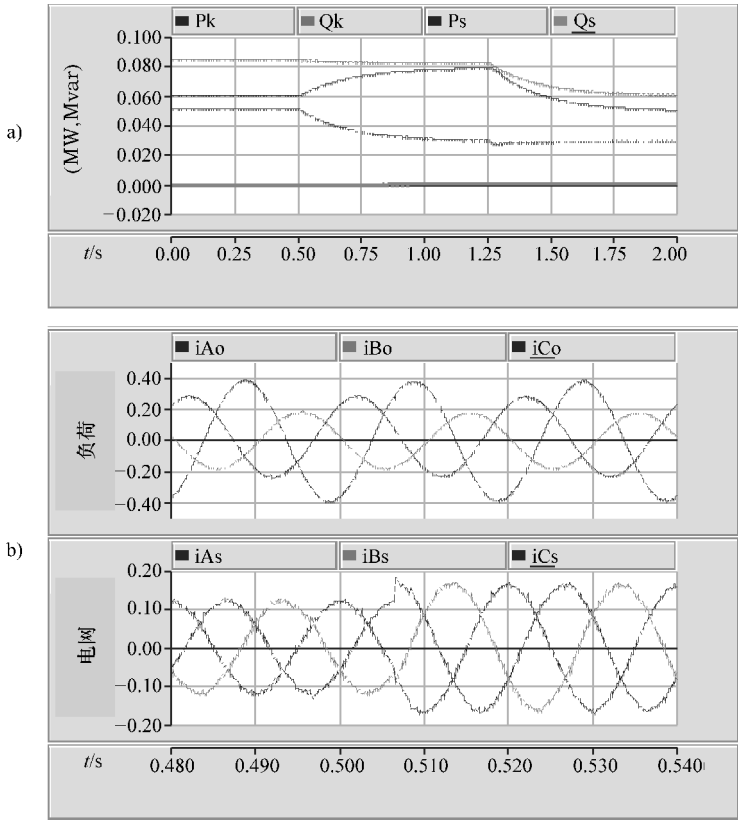


图 6.8 连接提供辅助服务电源的逆变器的仿真运行

- a) Pk、Qk 分别是电源的有功和无功功率，Ps、Qs 分别是电网的有功和无功功率
b) iAo、iBo、iCo 是负荷电路；iAs、iBs、iCs 是电网电流

参考文献

- [1] Directive No 2001/77/WE of 27 September 2001. Directive on the Promotion of Electricity Produced from Renewable Energy Sources in the Internal Electricity Market.
- [2] M. H.-J. Bollen, Y. Yang and F. Hassan, Integration of distributed generation in the power system – A power quality approach, *Proc. 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Wollongong, Australia, 2008.
- [3] R. Smit, *Cogeneration, Power Quality Application Guide*, Section 8 – Distributed Generation, LPQI, www.lpqi.org
- [4] J. Driesen and F. Katiraci, Design for distributed energy resources, *IEEE Power & Energy Magazine*, May/June 2008.
- [5] H. Jiayi, J. Chuanwen and X. Rong, A review on distributed energy resources and MicroGrid, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **12**, 2008, pp. 2472–2483.
- [6] Z. Styczynski and P. Komarnicki, *Distributed Energy Sources and Power Quality*, Energy Storage Systems, Leonardo Power Quality Initiative, <http://www.leonardo-energy.org/>
- [7] Directive No 2004/8/WE of 11 February 2004. Directive of the European Parliament and of the Council on

- the Promotion of Cogeneration Based on a Useful Heat Demand in the Internal Energy Market and amending Directive 94/42/EEC.
- [8] C. Marnay, H. Asano, S. Papathanassiou and G. Strbac, Policymaking for microgrids, *IEEE Power & Energy Magazine*, May/June, 2008.
 - [9] A. Oudalov, T. Buehler and D. Chartouni, Utility scale applications of energy storage, *Proc. 2008 IEEE Energy 2030 Conference (ENERGY 2008)*, 2008.
 - [10] A. Oudalov, D. Chartouni, C. Ohler and G. Linhofer, Value analysis of energy storage applications in power systems, *Proc. 2006 IEEE Power Systems Conference and Exposition (PSCE'06)*, 2006.
 - [11] P. Tomczyk, *Energy Storage Systems* (in Polish), <http://www.smartgrid.agh.edu.pl/index.php/materialy5>
 - [12] <http://www.piller.com>
 - [13] <http://www.amsuper.com>
 - [14] S. C. Smith and P. K. Sen, Ultracapacitors and energy storage: Applications in electrical power system, *Proc. 40th North American Power Symposium (NAPS'08)*, 2008.
 - [15] H. Wei, W. Xin, G. Jiahuan, Z. Jianhua and Y. Jingyan, Discussion on application of super capacitor energy storage system in microgrid, *Proc. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN'09)*, 2009.
 - [16] C. L. T. Borges and D. M. Falcão, Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement, *Electrical Power and Energy Systems*, **28**, 2006, pp. 413–420.
 - [17] C. Marnay, G. Venkataramanan, M. Stadler, A. Siddiqui, R. Firestone and B. Chandran, Optimal technology selection and operation of commercial-buildings microgrids, *IEEE Transaction on Power Systems*, **23**(3), 2008.
 - [18] N. Hatzigiargyriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, Microgrids. An overview of ongoing research, development and demonstration projects, *IEEE Power & Energy Magazine*, July/August, 2007.
 - [19] F. Katiraci, R. Iravani, N. Hatzigiargyriou and A. Dimcnas, Microgrid management. Controls and operation aspects of microgrids, *IEEE Power & Energy Magazine*, May/June, 2008.
 - [20] B. Kroposki, T. Basso and R. DeBlasio, Microgrid standards and technologies, *IEEE Power and Energy Society General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008.
 - [21] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papathanassiou and N. Hatzigiargyriou, Making microgrids work, *IEEE Power & Energy Magazine*, May/June, 2008.
 - [22] R. Zamora and A. K. Srivastava, Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 2010, pp. 2009–2018.
 - [23] N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 2011, pp. 186–202.
 - [24] S. Faias, P. Santos, F. Matos, J. Sousa and R. Castro, Evaluation of energy storage devices for renewable energies integration: application to a Portuguese wind farm, *Proc. 5th International Conference on European Electricity Market (EEM 2008)*, Lisbon, Portugal, 2008.
 - [25] K. Qian, C. Zhou, Z. Li and Y. Yuan, Benefits of energy storage in power systems with high level of intermittent generation, *Proc. 20th International Conference on Electricity Distribution – Part 1 (CIRED 2009)*, Prague, Czech Republic, 2009.
 - [26] E. Veldman, M. Gibescu, J. G. Slootweg and W. L. Kling, Technical benefits of distributed storage and load management in distribution grids, *Proc. 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference*, Bucharest, Romania, 2009.
 - [27] R. H. Lasseter and P. Piagi, Microgrid: A conceptual solution, *PESC'04*, Aachen, Germany, 20–25 June, 2004.
 - [28] B. Awad, J. Wu and N. Jenkins, Control of distributed generation, *Elektrotechnik & Informationstechnik*, **125**(12), 2008.
 - [29] A. Chuang and M. McGranaghan, Functions of a local controller to coordinate distributed resources in a smart grid, *IEEE Power and Energy Society General Meeting – Converse and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008.
 - [30] E. Alvarez, A. C. Lopez, J. Gomez-Aleixandre and N. Abajo, On-line minimization of running costs, greenhouse gas emission and the impact of distributed generation using microgrids on the electrical system, *IEEE PES/IAS conference on Sustainable Alternative Energy*, 2009.
 - [31] F. A. Mohamed and H. N. Koivo, On-line management of microgrid with battery storage using multiobjective optimization, *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drive POWERENG 2007*, 12–14 April, 2007.
 - [32] H. Vahedi, R. Noroozian and S. H. Hossceini, Optimal management of microgrid using differential evolution approach, *7th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 23–25 June, 2010.

- [33] H. Asano and S. Bando, Economic Evaluation of Microgrids, *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2008.
- [34] W. Gu, Z. Wu and X. Yuan, Microgrid economic optimal operation of the combined heat and power system with renewable energy, *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 25–29 July, 2010.
- [35] X. Guan, Z. Xu and Q.-S. Jia, Energy-efficient buildings facilitated by microgrid, *IEEE Trans. Smart Grid*, **2**(1), 2011.
- [36] C. A. Hernandez-Aramburo and T. C. Green, Fuel consumption minimization of a microgrid, *39th Industry Application Conference Annual Meeting*, 3–7 October, 2004.
- [37] S. Chakraborty and M. G. Simoes, PV-microgrid operational cost minimization by neural forecasting and heuristic optimization, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008.
- [38] A. Borgetti *et al.* An energy resource scheduler implemented in the automatic management system of a microgrid test facility, *International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP'07*, 21–23 May, 2007.
- [39] A. Dimeas and N. Hatziaargyriou, Operation of a multi-agent system for microgrid control, *IEEE Transaction on Power Systems*, **20**(3), 2005.
- [40] J. A. Pecas Lopes, C. L. Morcira and A. G. Madurcira, Defining control strategies for microgrids islanded operation, *IEEE Trans Power Syst.*, **21**(2), 2006, pp. 916–24.
- [41] C. M. Colson and M. H. Nehrir, A review of challenges to real-time power management of microgrids, *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2009.

深入阅读材料

- T. Ackermann, G. Andersson and L. Söder, Distributed generation: a definition, *Electric Power System Research*, **57**, 2001, pp. 159–204.
- I. J. Balaguer, U. Supatti, Q. Lei, N.-S. Choi and F. Z. Peng, *Intelligent Control for Intentional Islanding Operation of Microgrids*, ICSET, 2008.
- E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburo and T. C. Green, Energy management system with stability constraints for stand-alone autonomous microgrid, *Systems of Systems Engineering*, 2007.
- S. Chowdhury, S. P. Chowdhury and P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*, IET renewable energy series 6, London IET, 2009.
- N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen and G. Strbac, *Embedded Generation*, IEE Power and Energy series 13, IET, London, 2000.
- R. Mieński, R. Pawelek, I. Wasiak, P. Gburczyk, C. Foote, G. Burt and P. Espie, Power quality improvement in LV network using distributed generation, *IEEE 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Lake Placid, USA, 12–15 September, 2004.
- R. Mieński, R. Pawelek, I. Wasiak, P. Gburczyk, C. Foote, G. Burt and P. Espie, Voltage dip compensation in LV networks using distributed generation, *IEEE 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Lake Placid, USA, 12–15 September, 2004.
- R. Pawelek, I. Wasiak, P. Gburczyk and R. Mienski, Study on operation of energy storage in electrical power microgrid – modelling and simulation, *Proc. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, September 2010*, Bergamo, Italy.
- S. C. Smith, P. K. Sen and B. Kroposki, Advancement of energy storage devices and applications in electrical power system, *Proc. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008.
- G. Venkataramanan and C. Marnay, A larger role for microgrids, *Energy Magazine*, May/June, 2008.

第 7 章 电 动 机

Joris Lemmens 和 Wim Deprez

在过去十年中，电动机系统的能源效率得到了人们的广泛关注。这种趋势潜在的原因可以在能源部门面临的挑战中得到解答。随着全球经济的预测增长，能源消耗越来越多。如果能源需求（至少部分）不和经济增长脱钩，那么对自然资源和环境的不间断压力是不可避免的。因此，必须要有一个关于能源供应和使用的全球性变革。其中包括多种技术和方案，以提高“耗能产品”（EuPs）的能量利用率为核心来减少全球能源消耗。不难理解，增加电动机的效率就是其中最好的措施之一。

一般而言，电动机系统广泛存在于工业、服务业和楼宇。在能源消耗方面，电动机系统大约占当今总电能需求的 40%。在工业上约 65% 的电能是由电动机消耗使用的^[1]，大部分（96% 以上）的工业电动机为交流电动机，其中约 90% 是感应电动机（IM）。对于扩展后的欧盟（EU-27）来说，在 2006 年的总用电量为 3268 亿 kWh，其中工业总用电 1143 亿 kWh，特别是工业电动机系统用电就为 742 亿 kWh^[2]。到 2020 年，估计欧盟 27 国的工业用电量接近 1432 亿 kWh，如果不采取任何行动，工业电动机将消费其中的 859 亿 kWh。但是，如果欧盟在这些电动机系统中尽一切的可能节约（估计为 31%）能源，其结果将是，每年可节省 270 亿 kWh，相当于西班牙在 2000 年的总用电量^[1]。需要注意的是，电动机系统总用电量应当把服务行业和建筑物潜在电动机系统用电量也考虑在内。

在 2006 年，欧洲（EU-15）低压交流电动机市场估计有 900 万台存货。在常见的应用场合，如加热和冷却设施、电梯、自动扶梯和运输设施，主要用的是感应电动机，因为它们强大、免维护、灵活且高效，并符合低成本、高效益的生产。这就是为什么感应电动机在引进变速驱动器 [变频器或变速驱动器（VSD）] 后被称为行业的主力，甚至是工业的龙头。在过去的几十年里，大多数关于能源效率（技术规范）的关注和努力都集中在感应电动机上，但是不断变化的边界条件，例如环境问题，日益增加的能源成本、材料成本，强制性最低能效要求等，都意味着其他类型电动机和技术成为更多人的选择。预期的低功耗和/或其他特定应用类型的电动机，例如永磁同步电动机（PMSM），要达到最高要求^[3]。

本章关于电动机的效率的论述中，并不打算深入探讨最先进的电动机技术，而是重点介绍电动机系统运行效率，了解电动机如何去转换电能，而不是消耗它。大

部分输入的电能转化为机械（轴）能，根据应用电动机技术、材料、设计、环境条件等，部分电能将在电动机（和转换）中损耗。投资于能效更高的驱动器来减少损耗是出于经济、生态和立法的角度来考虑的。电动机属于所谓的“能源使用产品”或耗能产品。购买和维护成本只是使用电器过程中所有成本的一小部分，特别对连续工作的负荷而言。举一个例子，假设一个 7.5kW 的感应电动机，满负荷连续工作的效率为 89%，并且预期寿命为 25000h，采购成本为 70 欧元/kWh，能源成本为 10 欧元/kWh。采购成本只花费 525 欧元，能源成本花费 21067 欧元，分别占总成本的 2.5% 和 97.5%。请记住，从经济和生态的角度来看，由于能源价格的不断增长和能源在电动机驱动系统中的大量使用，提高电动机驱动效率的投资和研发是必要的。

这个简短的介绍，指出关注电动机驱动系统效率的不同点，因为这些项目在接下来的内容中会有涉及。关于电动机系统的能源效率有两个不同的方面：一方面是技术原因而造成电动机、变频器和机械上面的能量损耗；另一方面是关于电动机系统能源效率的政策、立法和标准。后者则需要启用高效电动机驱动器的市场，同时保证高效率电动机（HEMS）生产标准在一些厂家中得以实施，例如 OEM（原始设备制造商）。

7.1 节集中讲电动机上的各种损耗，首先是对不同的损耗成分进行说明，接着是针对不同实际操作条件对效率的影响；7.2 节是制定效率的测试和分类标准；在 7.3 节中，简要讨论高效率电动机所使用的技术在材料、设计和制造方面的发展。

7.1 电动机损耗

为了理解能源效率和电动机、驱动器的发展潜能，对电动机损耗的一个基本的了解是必需的。多种类型的电动机（见图 7.1），在工业应用中，如在前面已经指出的那样，笼型感应电动机是最常见的。因此，在过去的几十年里，有关电动机的效率和损耗的讨论主要集中在感应电动机上。大多数的感应电动机损耗部分一般会影响到其他类型的电动机，当然是和顺序、幅度和相互分布有关的。

7.1.1 功率平衡和能源效率

感应电动机中的损耗，包括在定子绕组中的热损耗 P_s 和转子损耗 P_r ，由于磁滞效应和在叠层铁心的涡流造成的铁损 P_{FE} 、机械损耗 $P_{fr,w}$ ，由于摩擦而在轴承、风阻损耗、冷却风扇以及额外的或杂散的负载损耗 P_{SLL} ，它代表以往项目中未分类的损耗。

图 7.2 是电动机模式下感应电动机的能量平衡或桑基（Sankey）图，单项损耗箭头的宽度与具体的功率值是成比例的。

从理论上讲，确定电动机或发电机模式的效率是相当简单的。它是输出机械功率 P_{mech} 与输入的电功率 P_{el} 之间的比率，通常以百分比表示 [见式 (7.1)]。从桑

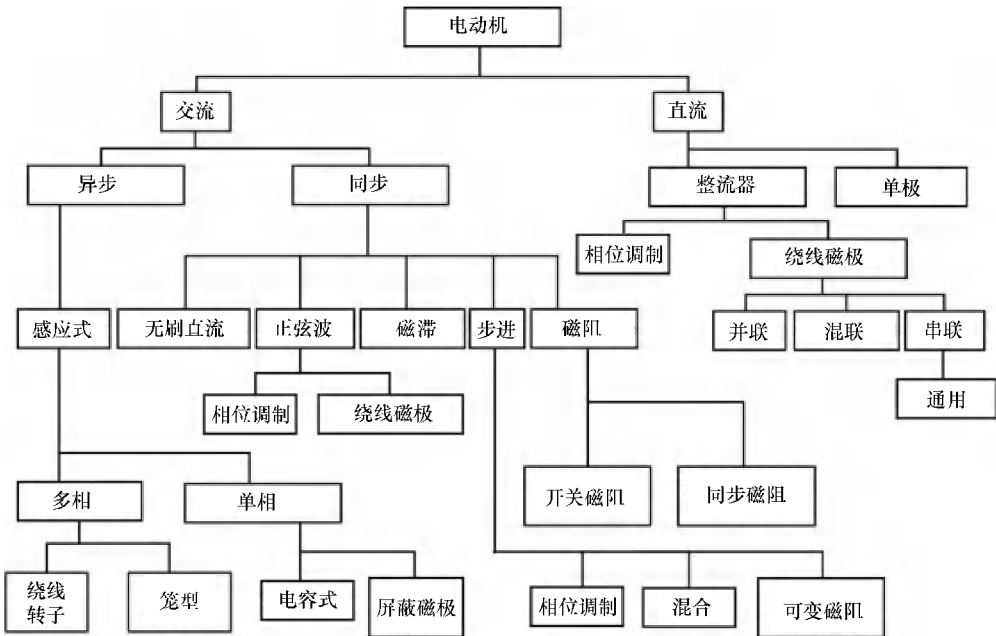


图 7.1 根据工作原理分类的电动机

基图中可以看出，输入和输出功率流之间包含的损耗 P_{loss} 明显不同，所以效率也可以表示为电功率和损耗的函数：

$$\eta_M = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{el}}} = 1 - \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{el}}} \quad (7.1)$$

基于式 (7.1)，测试效率的方法可分为直接法和间接法。对于直接法来说，电能和机械能必须要测出来，这就需要精确的功率分析仪以及速度和转矩测量设备。对于精确的转矩测量，转矩传感器的测量范围要和电动机的额定转矩相匹配。此外，通过该方法得到的效率值取决于环境温度和电动机的温度，这对于实验的效率和可重复性来说是不利的。用这种方法来测不同的温度条件（环境）下的电动机效率值是其方法无法比拟的。此外，可以被证明的是，这种直接法测出的精确度很低，即使是在使用精良设备的条件下。

另一种测量方法，间接法，是基于分开测定各部分损耗即所谓的“偏析损耗 (Segregation of losses)”。它适用于几种不同类型的电动机 DOL（直接联网——直接

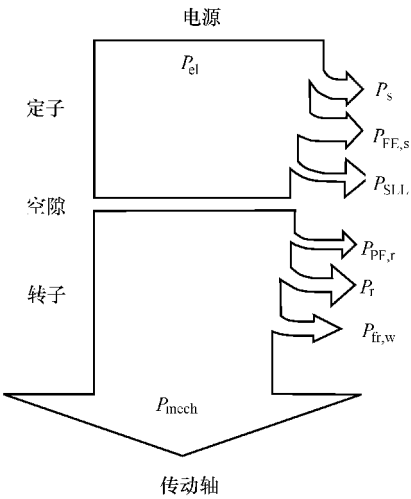


图 7.2 感应电动机的功率平衡或桑基图

连接到电网的电动机)，但主要是用于感应电动机。它能在负荷和零负荷的测试中，准确地确定常规的损耗，包括定子和转子热损耗、铁损、摩擦和风阻损耗。然而，早在 1912 年，它就表明偏析法所确定的总的常规损耗与从负荷直接测得的总损耗之间的差异是合理的。这种差别涵盖了不包含在常规损耗中的损耗。这种额外的功率损耗成分，被称为杂散负荷损耗，是实际使用过程中电动机不理想的性质所产生的寄生效应造成的（见下文）。直接去测量这部分的损耗是不现实的，但是有几种可能的方法可以计算出它们。确定测定杂散损耗所用的方法关系着感应电动机效率测量标准间的差异。间接法比直接法好的主要地方是整体测量精确度较高，它们允许把不同的损耗成分校正到一个指定周围环境和参考电动机温度下，来减少测量偏差。

7.1.2 损耗分类

根据比例定律，效率提高伴随着活动的部分（铁心和导体）数量的增加。通过绘制的额定效率对一系列电动机的额定功率的关系图可以说明这一点（见图 7.3）。

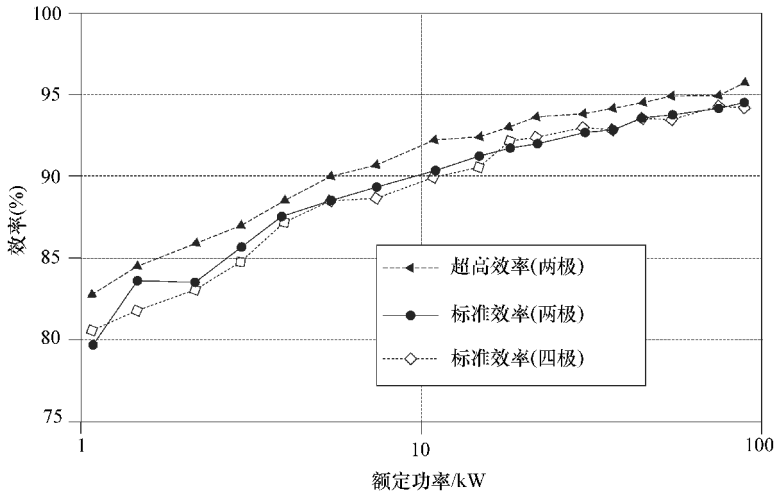


图 7.3 额定负荷时铁框架两极和四极标准感应电动机的效率和两极超高效电动机出厂数据

图 7.4 所示的是按照电动机的额定功率相互分布的各部分损耗。铁心和转子的损耗的相对比例，几乎和框架大小无关。平均来说，它们每一个约占整体损耗的 20%，引进高效率的感应电动机设计，例如，铜转子对这种状况的改变就非常多。这些损耗之间的相互关系会在后面详细阐明。对于较低功率的电动机，在定子绕组中热损耗占主导地位。它们大约占整体损耗的 50%，而对于大型电动机，减少约为 25%。对于兆瓦级的电动机而言，杂散负荷损耗会从非常低上升到总体损耗的 10%。其中或多或少可以看作摩擦和风阻损耗的一部分。

从各部分损耗命名中明显可以看出它们发生在感应电动机的位置。这样的分类

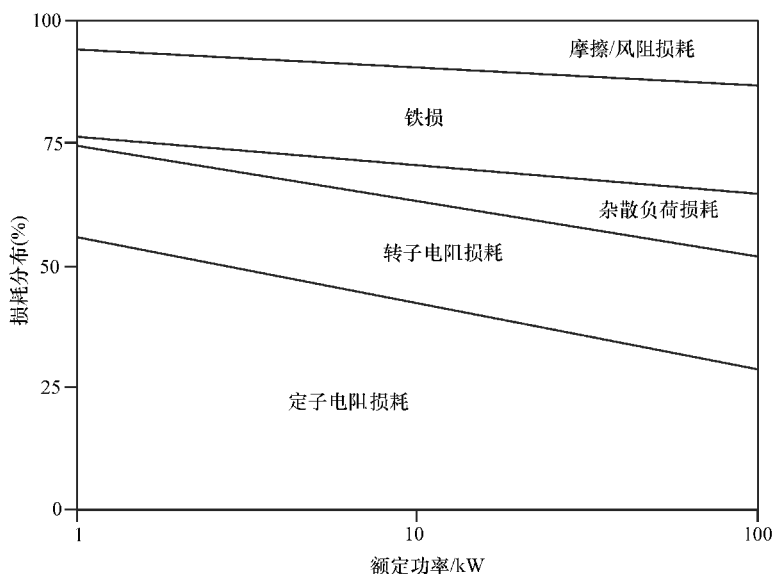


图 7.4 按感应电动机额定功率的损耗组成分布

结果只有三个可能的位置：绕组（定子和转子）、磁路（定子和转子的铁心）、轴承和空隙（机械损耗）。杂散负荷损耗也同样存在于定子和/或转子的一个或多个部分。

电磁损耗可以分为绕组和铁心损耗，这些损耗进一步可以细分为空间谐波和时间谐波损耗。在一般情况下，假设电能质量好，时间谐波分量对恒定速度（电源）情况下电动机的运行影响有限。但是，它们必须考虑到当感应电动机电源由电力电子变换器供给的情况。空间谐波在定子和转子的 MMF 相关的使用（施工）上，有其局限性，如开槽、磁饱和和偏心。所有谐波分量都会引起定子和转子、铁心和绕组中额外的损耗。

另一种可能的分类被作为按几个效率标准区分损耗类型的基础。这种分类方法将损耗分为两部分：常数和负荷。损耗分量假定为常数，包括摩擦、风阻损耗和铁损。基于电动机几何结构和材料数据，这些损耗的计算量是不简单的，特别是铁损的计算。斯坦梅茨（Steinmetz）得出了近似的磁心损耗的表达式：

$$P_{\text{core}} = P_{\text{hyst}} + P_{\text{eddy}} = k_{\text{hyst}} f B^n + k_{\text{eddy}} f^2 B^2 \quad (7.2)$$

式中 P_{core} ——铁心损耗；
 P_{hyst} ——磁滞损耗；
 P_{eddy} ——涡流损耗；
 f ——正弦磁场的频率；
 B ——通量密度；

k_{hyst} 、 k_{eddy} 和 n ——系数，它们取决于纹理材料、厚度、电导率和其他（几何）因素。

它可用于分析或 FEM（有限元模型）法，但即使在后一种情况下，核心定损

的主要问题依然存在：磁通密度在幅值（取决于饱和度）和/或方向上是不断变化，并具有谐波分量。此外，由于机械制造中的磁特性退化是不恒定的，很难在一个模型中顾及。

为了从实验中确定这些持续的损耗，所谓的空载试验是最常用的。更多关于这个实验和按照不同的标准进行成分分解在 7.2.2 节中会有涉及。必须指出开槽的影响也存在于空载，在这种模式下空间谐波与之并存。因此，铁损实际上包括额外的损耗，称为无负荷杂散损耗。

负荷损耗包括在定子绕组中的铜损 (P_s)，转子导体中的损耗 (P_r) 和杂散负荷损耗 (P_{sll})。定子铜损计算要考虑相对应的负荷电流和绕组电阻。测量绕组电阻，并根据指定基准温度下的标准进行校正。

转子导体的焦耳损耗也和电动机的负荷电流成正比。在实际的稳定空载状态下，实际速度非常接近理想状态。转子转差率非常小，它引起的转矩可以弥补机械损耗。相应的转子电流和频率及其产生在转子上的铜损和铁损是非常小的，实际上，它们涵盖在恒定损耗中。当电动机被加载时，滑移会增加平衡负载转矩。这时，由此产生的转子电流开始在转子中造成越来越多的焦耳损耗。由于转子频率在一台感应电动机的整个运行范围内保持得相当低，所有与负荷相关的转子损耗可以被视为焦耳损耗。转子损耗可以确定为滑动部分的空隙功率。对于这些损耗，还有根据不同标准和应用的校正方法。

杂散负荷损耗中至少部分是不包括在（视为常数）铁损的谐波损耗中的，这些损耗都是其次，最重要的是负荷引起的损耗。它们关系到实际中的三个电动机限制：

- 1) 电动机铁心电工钢磁性的局限性，从而导致局部饱和。
- 2) 事实上，实际几何使用的是插槽和一个离散而不是连续的正弦绕组，从而引发的空间谐波和漏磁通。
- 3) 制造过程中的工业缺陷，例如转子笼条绝缘的不完善可能会引发交叉电流 (cross - bar current)。

其他额外的损耗包括发生在铁心负荷和电动机金属片的损耗以及目前尚未解决由漏磁场造成的定子和转子导体中的电涡流损耗。它们导致电动机发热和电动机转矩减少。这些损耗的起因、结果和仿真分析成为很多出版物的研究重点。在一些出版物中可以找到一个关于这些额外损耗的起因、组成成分、测量方法和影响的全面概述^[4,5]。

7.1.3 影响因素

感应电动机或其他类型的电动机，只是电动机应用组件中的一个。整个系统的效率取决于几个因素，如电动机效率、温度和施胶、电动机控制、机械传动装置、维修方法、机械效率、在供应系统中的损耗、供电质量等。因此，可以得知影响系统效率的重要因素。全面地给一个详尽的介绍是几乎不可能的，因为每个应用场合

都有特定的要求和边界条件，然而最常见的典型问题和实例可以给出。

在大多情况下，电动机的铭牌或产品目录中，只有效率的额定值，是根据一定的标准确定的。这个值甚至是部分负荷值都取决于固定的边界条件（如温度和电压）。在额定值相对稳定的情况下，即在正常条件下，电动机可以在额定负荷下持续工作（几乎不停止）。实际上，电动机达到热平衡状态是设计时就有考虑的，电动机的各个部件温度都在控制内。在实际应用中，这些条件很少见，而结果就是电动机温度将偏离标准值。这时，电动机往往没有工作在额定功率下，而是工作在一个较低的功率下，或者特殊情况时工作在较高的功率下。引起这种欠载或者过载的因素有多个（例如起动转矩）。因此，实际的效率和铭牌上面的值会有差异。实际中电动机在工作条件下最重要的“偏差”有^[6]：

- 1) 负荷条件下，不同的额定输出；
- 2) 不同的工作温度；
- 3) 由于维护不当导致的不良因素；
- 4) 电力供应条件有变化（电能质量问题）。

7.1.3.1 温度的影响

不同的亏损部分是随温度变化的，绕组电阻每上升约4%，温度上升10K，同时铜损的比例会上升。很明显，它取决于电动机的尺寸，这种依赖关系对额定负荷时电动机效率的影响可达0.2%~2%。风阻损耗变化与温度成反比。相对湿度为80%和在一个标准大气压下、在所考虑的温度下的风阻损耗随着温度每上升10K，它们将减少4%~5%。铁损随着温度的升高而减少，根据片材的质量和磁通密度，它们在100℃下比在环境温度下低4%~8%^[6]。从图7.5中，可以明显地看出温度条件影响实际效率值。

7.1.3.2 局部负荷

图7.5中的虚线代表一种典型的效率特性，也就是根据效率标准记录的负荷对电动机效率的依赖性。从这个数据也能清楚地知道实际应用、连续工作、部分负荷效率确定标准的不同，主要是由于温度的影响。可以知道负荷依赖的效率（以恒定温度为基准）是可以在数学上定义的。这种方法把损耗按额定功率 P_N 拆分为独立于负荷外的分量 P_0 和依赖于负荷的分量 P_L 。因此效率可以近似为

$$\eta_{(p)} = \frac{1}{1 + \frac{v_0}{p} + v_L p} \quad (7.3)$$

式中 $p = \frac{P}{P_N}$ ；

$$v_L = \frac{P_L}{P_N}；$$

$$v_0 = \frac{P_0}{P_N}。$$

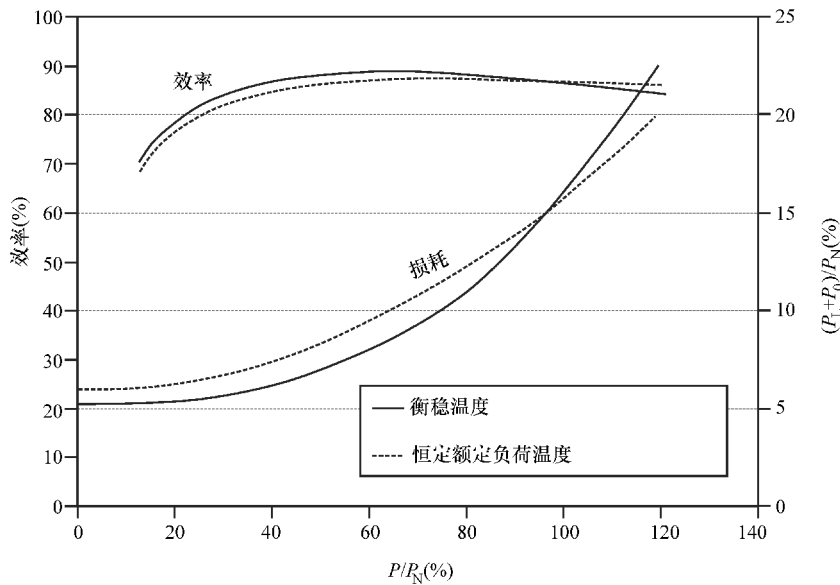


图 7.5 工作温度对电动机效率的影响和具体损耗总额 ($(P_L + P_0)/P_N$) (P_L 是取决于负荷的一部分损耗, P_0 是恒定的损耗, P_N 是额定功率)^[7]

由此可以看出, 在负荷点的最大效率 [见式 (7.4)] 位于点 $p^* = \sqrt{v_0/v_L}$, 在这点上依赖负荷的损耗等于常数损耗:

$$\eta^* = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{P_0 P_L}}{P_N}} \quad (7.4)$$

7.1.3.3 保养

了解到这些机理, 可以避免不当的保养习惯对(感应)电动机可能的影响。例如, 当系统在操作的环境中掺进了特定的污垢, 中间泄漏物或其他废物时, 清洁电动机, 特别是它的冷却散热片和冷却风扇入口很重要。如果不合时宜地处理, 可能对冷却性不利, 从而增加整体的损耗造成效率下降的后果。即使降低工作效率不是一个问题, 在这种情况下会在更高的温度下达到热平衡状态, 可能会导致电动机的早期故障。另一个例子是维护轴承, 如果轴承没有及时上油或者替换, 它们会造成较高的摩擦损耗。

7.1.3.4 偏离供给条件

电力供应条件对电动机的损耗和效率有显著的影响。许多人在他们的出版物中介绍了这个问题^[9]。也有单独的标准, 其中甚至包括典型值的显著影响。例如, IEC 60038 和 EN 60150 所关心的是供电质量, EN 61000 - 2 - 4 EMC 是抗噪标准, IEC 60034 - 28 对应电压不平衡和降额, EN 60204 - 1 是对电气设备的要求。特别

是因为笼型感应电动机的灵敏度受电压不平衡和/或谐波影响,后者描述的影响包括它们是如何影响热条件下的数据。这些热条件的改变大多会导致绕组温度增加,因此要按规定在某种程度上减少连续输出的功率以保护绕组的绝缘(即减额)。

作为一个例子,图 7.6 给出了一个感应电动机在标准测试条件下和不平衡电压条件下的效率特性。在三相系统中,电压不平衡现象是指(基波)电压或连续阶段之间相位角的方均根不相等的现象。当给感应电动机加上不平衡电压时,会产生一个额外的断裂转矩,产生额外的损耗,并可能导致电动机故障^[6]。电力供应不平衡的状况下,电动机效率低,该图还给出了不平衡供电和平衡供电间电动机效率偏差的的最大值以及极大值、极小值。

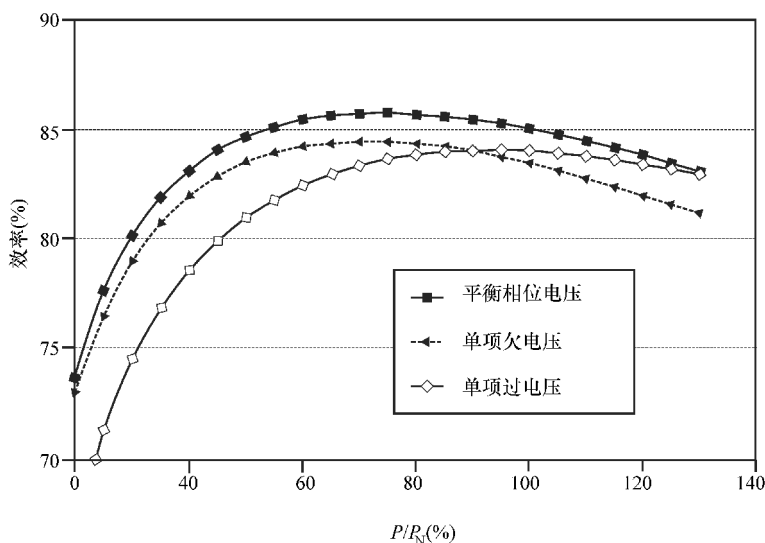


图 7.6 根据 IEEE 112-B 通用标准的 7.5kW 感应电动机效率特性以及在单相上有一个超过或低于正常电压 4% 的电压不平衡因子 (VUF) 的不平衡情况

7.1.3.5 变换操作、电能质量和供电系统

正如前面已经指出的,谐波会导致额外的电动机损耗。几个出版社以模拟和实验为基础,专门讨论了这一议题。它们表示频率变换器使用时产生的谐波损耗增加,同时也产生了噪声和可变速度感应电动机驱动 (IGBT) 逆变器中的损耗,而电压反射和相关的接地问题甚至会损坏轴承^[10-12]。

供应系统部件,如电缆和变压器中的损耗也被称为“分配的损耗”。这些损耗不能忽视,因为超载的部件可能会增加损耗。此外,这些系统组件在设计时应考虑在部分负荷条件下的功率因数的偏差。

7.1.3.6 机械传动

有些应用需要机械传动。对于这样的传输,有几种可能的解决方案,例如齿轮

箱、V带、带齿传动带、嵌齿轮（螺旋或锥齿轮）、涡轮等。一般情况下，传动带效率比较高，例如90%是V带，97%是带齿传动带。嵌齿轮有98%的效率都是可能的。工作效率也可以说是齿轮的负荷的能力，涡轮效率的高低取决于负荷的大小。

7.2 电动机能效标准

7.2.1 功能分类标准

电动机驱动系统的效率是非常重要的，特别是在感应电动机为工业提供大部分能量的情况下，即使是适度增加电动机的效率都将在环境、经济和战略方面得到可观的效益。政府在通报和调控的责任下，对设备效率的相关事宜已经越来越积极。有许多国家和国际上一致鼓励提倡分类标准。对于欧洲来说，这反映正在进行的不同方案：“欧洲电动机挑战计划”，之前工业交流电动机的分类方案包括EFF1、EFF2、EFF3，标签源于CEMEP（欧洲电机和电力电子制造商委员会），即“4E电动机系统附件”，最后，新的IEC 60034-30 IE分级标准颁布了，这个标准是协调不同电动机分类的若干措施和请求的结果，而事实上也是全球范围内的效率标准。图7.7和表7.1中给出的是这些IE效率等级和美国以及前欧洲分类标准的对比。

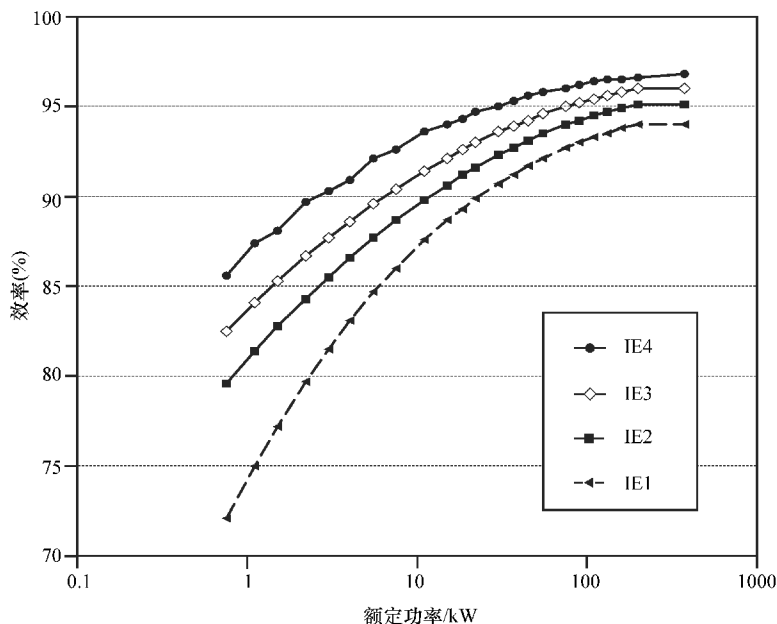


图 7.7 表示 IEC 60034—30 标准中定义的新的 IE 效率等级（四极）

表 7.1 欧洲和美国统一的分类标准 IEC 60034 - 30

效率等级	IEC 60034 - 30	欧洲 (CEMEP)	美国
超高级	IE4		
高级	IE3		NEMA 高级
较高级	IE2	EFF1	Epact
标准	IE1	EFF2	

这个 IE 分类标准合并了美国 NEMA 高级/Epact 和欧洲 CEMEP 类的主要方面，因此它现在对 50Hz 以及 60Hz 的 2、4 和 6 极电动机都有效。这是一个针对 0.75 ~ 375kW 的交流电动机的全球自愿性标准。共有 4 类（IE1 ~ IE4），为未来的类别留出了空间。IE4 类也将适用于额定负荷和部分负荷条件下的逆变器电动机，如 PMSM。特别是，这最后的功能是一个渐进的措施，可以促进高效节能驱动器的正确推广。

这个新标准 IEC 60034 - 30 涉及全世界范围内各种不同的效率等级，无论它是自愿的还是强制性的，这是积极的一步。然而，据以往的经验，这些不同的做法教给了我们一件事：强制性的 MEPS 积极地影响着接替效率水平（据自愿措施计算）的渗透率。因此，在 2009 年欧洲委员会将这一新的 IEC 分类翻译成一个指令（Dir. 2009/125/EG）。

本指令的适用范围和 IEC 分类相比是有限制的，但它在欧洲介绍了强制性的最低能效性能标准（MEPS）。它适用于工作在 50Hz 或 60Hz，电压最高可至 1000V，额定功率在 0.75 ~ 375kW 之间的 2、4 或 6 极三相，单速、连续运行笼型电动机。关于 IEC 60034 - 30 最重要的例子是水下电动机。电动机和应用是不能分别对待的，特别是设计用于特殊环境下（海拔或温度）的制动电动机。指令预计分为 3 个阶段，在这期间强制性的 MEPS 应引入和应用：

- 1) 16/06/2011：0.75 ~ 375kW 以上的 IE2 标准，从而结束 EFF2/IE1 标准。
- 2) 01/01/2015：VSD 應用程式采用最低 7.5 ~ 375kW 的 IE3 或 IE2 标准，从而结束 DOL 應用程式的 EFF1/IE2 标准。
- 3) 01/01/2017：应用于同样的 0.75 ~ 7.5kW 小电动机。

效率试验所用的标准是 IEC 标准 60034 - 2 - 1。这个不包括牵引电动机的交流电动机 IEC 测量标准修订版（2007 年），是为了协调其他重要的标准（IEEE）。但是，正如下面所说，在本标准是否适用于确定效率的几种方法上，仍然存在分歧。

7.2.2 测量标准

显然效率的分类决定效率的测量方法，商定并建立和完善国家和国际标准是无可非议的。然而作为效率的分类标准，在全球范围内使用的效率测量标准的确不同。对某个标准的仔细审查揭示了他们提出的方法^[13-16]上的重大差异，造成了效率值差异。这无论是对颁发证书还是对购买时电动机声明效率值的信誉都会产生严

重的影响。电动机系统组件源于“世界各地”的商品贸易。由于它们根据不同地方或国家的检测标准和性能标签的要求，在全球各地高效率的电动机市场的渗透率都有很大变化。

在一些出版物的评论中，有各方面和其他措施的问题，因此 IEC 启动了一个进程，以更新有争议的电动机效率的标准版本。经过一个漫长的过程，于 2007 年 9 月发布了新版本的 IEC 标准 60034 - 2 - 1。现在最常用的方法所描述的这一新效率标准，符合了这一领域其他的重要标准 IEEE 112 - B。然而，有另一种方法 (EH - Y) 来确定杂散负荷损耗。考虑到众多的“子方法”受各标准化组织的限制，就不能说（感应）电动机的效率测定标准是清晰、明确或统一的。不过应当指出，这个标准目前正在再次修订当中，最可能的结果是，这个有争议的方法 (EH - Y) 将会被删除。

此外，如前面所述，规定的方法中没有考虑到的是实际应用中的非理想工作条件，而不是标准中所描述的理想测试条件。例如，标准中明显对不平衡电源或电源质量不佳的有关事宜无记载。同样，以一个单一的额定负荷的效率值为基础来验证效率的做法是不可行的。

7.2.2.1 常规流程和试验设置

在 7.1.1 节中，介绍了关于 IMS 效率的两个表达式（式 7.1）（直接和间接），分别指出并讨论了不同的损耗成分，引入了直接和间接效率测定法之间的差异。直接测量法是不准确的，因为它直接套用所测量的机械能和电能。最重要的标准都是在间接法的基础上，来隔离或者概述损耗。正如前面已经指出的那样，5 种损耗成分必须使用间接法来确定：定子焦耳损耗 (P_s)、转子焦耳损耗 (P_r)、铁损 (P_{FE}) 和摩擦及风阻损耗 ($P_{fr,w}$) 这四个成分，主要表示为传统的损耗 P_{conv} 以及额外的杂散负荷损耗 (P_{SLL})。这些“额外”的损耗可以估计为测得的总损耗（电输入功率和机械输出功率之差）和常规损耗之差。

标准之间的主要区别包括确定测量杂散负荷损耗的方法。前面提到的计算 P_{SLL} 的方法通常被称为间接“输入 - 输出”法。一些出版物表明，该方法最适合用于准确测定杂散负荷损耗和感应电动机效率^[17-19]。请注意，该方法需要精确地测量转矩和速度，但它不直接应用于测量机械功率来得到效率。

第二间接法所规定的一些标准基于所谓的固定或可变限额来估计杂散负荷损耗。用这样的方法，还没有测量的机械功率（无转矩测量）和杂散负荷损耗大致等于一定的比例——限额——满负荷的输入功率（见表 7.4）。

最近纳入新版本 IEC 60034 - 2 - 1 标准的第 3 种方法是 Eh - star (EH - Y) 法。在这种方法中，杂散负荷损耗的测定是从一个单独的测试中获得的，测试中，感应电动机空载并且单相（非对称）特殊地连接一个辅助电阻 (R_{eh})。这种方法是非常有争议的，并极有可能在未来修订本标准时被删除。

很明显，负荷杂散损耗的估计是标准间的主要区别。显然，存在几种方法来确

在一般情况下，效率的测量过程包括 3 种类型的测试：（环境）温度和绕组电阻的测定；一个负荷测试（带或不带转矩测量），其中一定量的负荷转矩施加到电动机；无负荷试验，其中所述的定子电压逐渐下降。除该方法外，负荷杂散损耗的确定基于 $E_h - Y$ 过程，所有主要标准，都针对这 3 种类型的测试规定了类似的步骤。对于 $E_h - Y$ 测试，需要一个附加的测试步骤。

从无负荷测试中，可以分别得到铁损、摩擦和风阻损耗——空载损耗。从在每一个点的负荷测试测得的定子电流和定子电阻值来确定定子的焦耳损耗。根据所采用的标准，损耗在绕组电阻修正的基础上，修正为参考环境温度下的值。接着，通过电输入功率减去铁和定子焦耳损耗，可以计算得到转子焦耳损耗，即气隙功率的支路部分。

需要注意的是，对于一些标准，考虑到在测试过程中的温度偏差的影响，也有一个损耗（取决于温度）偏移修正。因此，如果杂散负荷损耗的确定是根据“输入-输出”的方法，它们也同样要做这种修正。每种不同的标准和方法都确定了一个不同的特定的测量阶段，同样在处理测量结果时，（温度）需要加以修正应用，以获得最终的效率值。除了不同的方法，确定杂散负荷损耗外，这些过程和修正的差异使得这些标准是不明确的。

7.2.2.2 测量标准之间的差异

正如前面所述，并强调在一些出版物中所述的那样，发现感应电动机最有效的测定方法之间的主要区别是在杂散负荷损耗的确定上。得到的感应电动机效率值取决于所使用的方法和标准。这种差异可达到效率的百分之几（见图 7.9）。在一般情况下，标准之间的差别不仅表现在确定额外损耗的技术层面上。还有其他的不同点或特殊性可以区分，这些差别的一些例子存在于术语、范围、标题、所需的仪器、精确度、提出的方法等中。尤其是最后两个例子对效率的最终结果有特定的影响。在比较或讨论不同的方法及其结果时应小心，尤其是这一结果的准确性，也应考虑进去。

关于感应电动机效率测定的最重要的两个标准是 IEC 60034 - 2 和 IEEE 112。IEC 60034 - 2 可追溯至 1972 年，但在 1995 年和 1996 年有更新/修订。IEC 61972 标准只涉及笼型异步电动机，而 IEC 60034 - 2 标准涵盖了一般的旋转电动机，不含牵引电动机，它被开发作为 1996 年版的 IEC 60034 - 2 标准的一种替代，但既未证实也未公布。这里提到的 IEC 61972 版本是（第一版）2002 年 11 月版。替代这个失败版本的是 2007 年 9 月 EC 发布的新版本，编号为 IEC 60034 - 2 - 1。重要的是要知道，这些标准提供了不同的方法来确定效率。与 IEEE 112 标准类似，以除 11 的方法，命名为 A、B、B1、C、…其中，B 标准是最重要和最著名的。IEEE 112 在 1964 年推出，最新的版本是在 1996 年和 2004 年制定的，而最新的版本只有少量的变化。全球标准的概述在表 7.2 中给出。

尽管这些各种各样的方法提供了不同的标准，大多数制造商的测试实验室和其

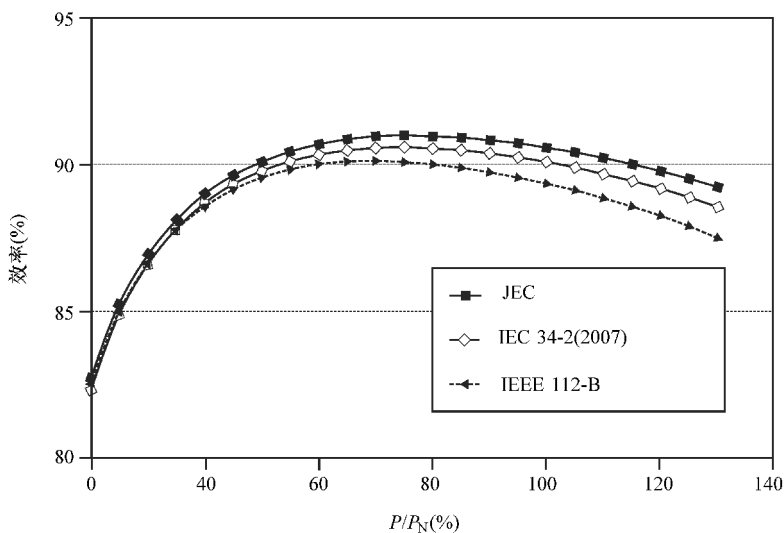


图 7.9 根据 3 个不同的标准测定的一个 4 极 7.5kW 的感应电动机的效率
(这个结果的效率差异高达百分之几)

他只使用一个或几个方法，最重要的方法在表 7.3 中。对于 IEEE 112 标准，最重要的方法是方法 B，即需要测量机械的转矩和速度的一种“输入－输出”法。IEC 60034－2（1996）中最常用的是一种间接的方法：不需要一个一个地测量机械转矩。在这个方法中杂散负荷损耗是根据一个固定的补偿（5% 的输入功率）得出的。事实上，存在 4 个重要的方法：输入－输出、定额补偿、可变补偿（见表 7.4）和 Eh－Y。这些确定杂散负荷损耗方法的差异导致测得效率差异。

表 7.2 根据最近的感应电动机（版本）的标准概述电动机效率的测定方法

	状态	年份/年	重要方法	备注
IEEE 112	有效	2004	方法 B	输入－输出方法，需要机械转矩和速度的测量；提供了一些其他的方法
IEC 60034－2 Ed. 3	过期	1996	固定 P_{SLL} 修正值	间接法，不需要测量机械转矩。提供了例如逆转速测试（RRT）等方法
IEC 61972	无效	2002	2	作为 34－2 可能的替代方法，提供了两种主要的方法： 1) 与 112B 相似的输入－输出 2) 间接 w /变量修正
IEC 60034－2 Ed. 4	有效	2007	3	最近发表的一种折中方法。拥有和 IEC 61972 一样的方法和 RRT，除了用于确定 P_{SLL} 的附加 Eh－Y 测试

(续)

	状态	年份/年	重要方法	备注
CSA C390 – 98	有效	2005	1	加拿大标准。与 IEEE 112B 非常类似，用于效率性能标准的局部最小值环境中
AS 1359.102	有效	1997	3	澳大利亚标准。提供了以下 3 种方法：与 IEC 60034 – 2 Amd. 2 (1996) 类似的间接法、测热法（非常精确但是昂贵且耗时）和 IEC 61972 中的输入 – 输出方法。预计将采用最新版的 IEC 60034 – 2 (2007) 标准
JEC – 2137 – 2000	有效	2000	2	日本标准。最初于 1934 年 2 月 23 日被作为 JEC – 37 引进，之后被修改数次。2000 年 3 月 27 日被再次修改，并重命名为 JEC – 2137。提出了数种方法，例如输入 – 输出方法和固定修正值等
GB/T 1032 – 2005	有效	2006	固定 P_{SLL} 修正值	中国标准。于 2005 年 9 月 19 日发布“三相感应电动机测试过程标准”，并于 2006 年 6 月 1 日实施。与 IEC 60034 – 2 (1996) 类似，提供了一种采用补偿杂散负荷损耗的输入功率的固定修正值为 0.5% 的间接方法

表 7.3 4 个主要的间接的方法的概要说明，如果它被包括在的效率标准中，
标准化测试方法的名称会有额外的注明

P_{SLL} 方法	IEEE 112	IEC 60034 – 2 (1996)	IEC 60034 – 2 (2007)	IEC 61972
输入 – 输出	是 B&B1 方法	否	是 负荷测试与 转矩测量	是 方法 1
固定修正值	否	是	否	否

IEC 标准与 IEEE 标准的主要不同：

- 术语：IEC 使用残差和杂散负荷损耗 Δ ，IEEE 采用杂散负荷和校正杂散负荷损耗
- 线性回归分析的最小关联因子表示测试的质量和重复度：IEEE 使用 0.9，IEC 为 0.95

假设满载情况下的总杂散负荷损耗占额定输入功率的 0.5% ($P_{SLL} = 0.5\% P_{el}$)。观察与可变修正值的不同之处

(续)

P_{SLI} 方法	IEEE 112	IEC 60034 - 2 (1996)	IEC 60034 - 2 (2007)	IEC 61972	
可变修正值	是 E1、F1 和 E1/F1 方法	否	是 指定的 修正值	是 方法 2	修正值大小基于电动机额定 功率 P_N ，但是 IEC 和 IEEE 标准 的指定值是不同的，见表 7.4 此外，IEC 采用 P_{el} 的百分比， 然而 IEEE 使用 P_N 的百分比
Eh - Y 电路	否	是	是	否	

表 7.4 依据 IEEE 112、IEC 61972 及 IEC 60034 - 2 (2007) 分配杂散负荷损失的限额

IEEE		IEC	
P_N 额定功率/kW	限额 ($P_N, \%$)	P_N 额定功率/kW	限额 ($P_{\text{el}}, \%$)
- 90	1.8	< 1	2.5
91 ~ 375	1.5	1 ~ 10000	2.5 ~ 0.5log (μ_N)
376 ~ 1850	1.2	> 10000	0.5
> 1850	0.9		

7.2.3 变速驱动器的未来标准

许多现代的应用程序需要准确的控制速度或转矩，这将会促进电力电子变换器的使用。此外，其他类型的电动机，如永磁同步电动机或开关磁阻电动机的固有的运行与电力电子变换器正越来越多地填补了市场空缺。它们甚至成为变速驱动器中感应电动机的经济替代品。

虽然 IEC 正在准备一个标记为 IEC 60034 - 31 的“高效节能电动机，包括变速应用选择和应用”的标准，但是到今天为止，没有一个国际公认的测试协议能够决定系统在不同的负荷驱动下的效率。然而对于正确设计，测量和驱动系统的节能性能分类，经典的电动机能效标准不能使用，因为它们只涉及直接起动。几个国际倡议试图填补这个空白，比如新 IE4 效率限制已经制定为整个的转矩 - 速度范围。此外，IEC 正在制定变速驱动器效率测定的新标准，即 IEC 60034 - 2 - 3：旋转电动机：用具体的测试方法来确定变频器供电交流电动机的损耗和效率。

关于变速驱动器系统效率的评估有 3 个主要问题。首先的一个问题是不同负荷下效率的测定。同直接起动的效率相比，变速驱动器系统有更多可能的工作点（速度、转矩的组合）和损失偏析的方法，因为它安装的大多数效率判定标准是不容易使用的。其次，变速驱动器的实质意味着其有更多的影响系统效率的自由度。事实上，电动机、变频器、控制算法和参数设置在电动机和变频器上的各自的损耗之间存在相互影响。那么何种机构、边界条件和设置才能客观地比较不同的电动机和驱动器，从而来确定效率。再者，在整个运行范围内没有任何统一的系统将变速

驱动器的效率进行可视化和分类。然而，在（电）驱动火车的时代背景下，一个有用的概念已经使用了多年，即所谓的效率的轮廓^[20]。事实上，它们是在绘制的效率值位点相同的情况下，横、纵坐标分别为速度和转矩的方程（见图 7.10）。

事实上，IEC 的效率分类已经表明：使用效率图来研究 IE4 电动机效率极限（如果电动机处于一定的速度 - 转矩范围内）的类似方向^[21]，但是在系统效率确定问题上尚无一致的特定方法。还没有提到的直接效率应测量电动机的多绕组连接和机械输出（轴功率）。因此这并未将电动机和变换器之间的相互影响或变换器自身的效率影响考虑进去。更重要的是，如果没有施加额外的预防措施或条件，很难保证得到精确可复写的效率测定。这可能与关于在线感应电动机的效率测定及使用的是损耗分离方法而不是直接法的相关驱动器相反。更进一步，最近，在 IEC 对感应电动机的效率分类方案的介绍、倡议和讨论变速驱动器效率的刊物中，提到了一种使用矩阵测试速度 - 转矩的类似方案^[22]。根据两种普通的设备类型，即恒转矩设备（如传送带）和二次转矩设备（如水泵）。

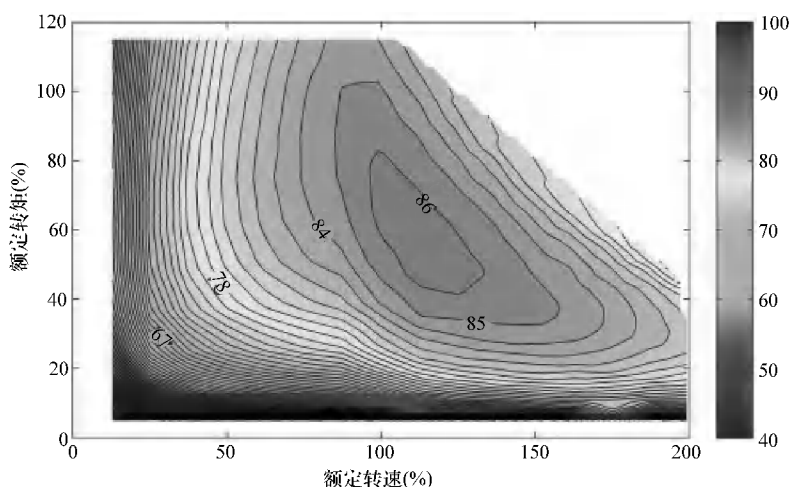


图 7.10 IE1, 11kW, 400V, 四极感应电动机和变换器效率图

7.3 高效电动机技术

为了改善大型电动机驱动系统的效率，需要做两方面的事。首先，就是通过施加基于（国际）国内的分类和计量标准的自愿或强制性的最低能效限值，来刺激高效电动机系统的标准化、分类和立法的一部分（见 7.2.1 节）。其次，通过科技进步来减少系统层面的损耗是必要的。最大的节约方式可以通过使用变速驱动器将电动机输出匹配到负荷的速度和转矩的需求上来获得，例如在泵送应用中。在接下来的一步中，电动机应该用一种所谓的高效电动机替代以降低其消耗。在谈到这种

高效电动机时，就产生这样一个问题，就是它和标准效率电动机有何不同，什么是高效电动机？问题的答案不好总结，因为使用更好的材料、设计和工艺技术来提高整个电动机的效率（见图 7.11）有许多可行的方法。

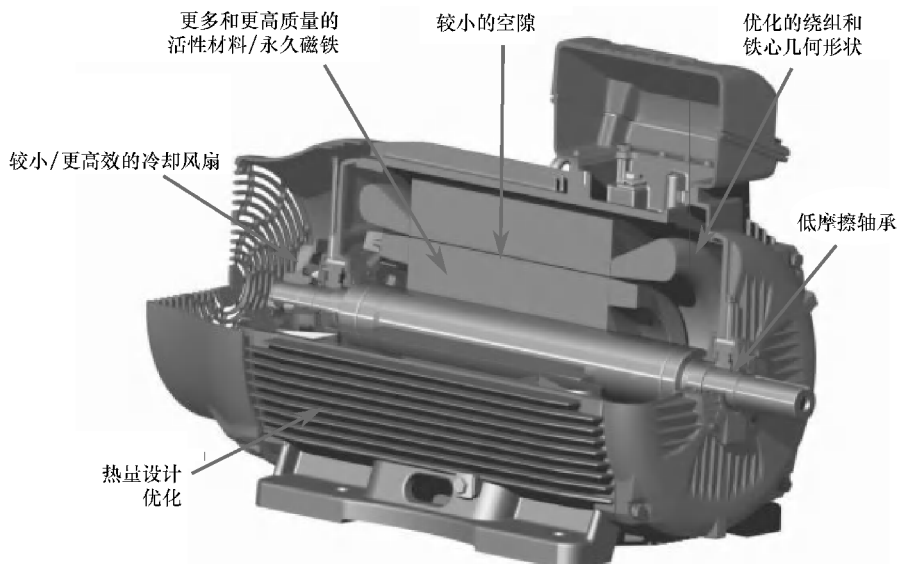


图 7.11 高效感应电动机剖面图显示了许多提高电动机效率的方法（摘自 WEG）

在保持电动机输出在一定水平时必须减少电动机损耗。其次，电动机的工作特性如起动和停止转矩、功率因数和堵转电流应该保持在一个合理的范围。为了完成这项任务，工程师必须彻底了解 7.1 节所谈到的电动机损耗的原因并找出主要影响因素。

减少主要损耗的传统方法是将更多和更高质量的活性物质添加到现有的设计中，主要通过增加尺寸、铁心或导体材料，将分别降低电动机中的波动和电流密度，使得相同功率输出的铁损和铜损得以降低。另一方面，使用高性能材料如高档层压钢或是铜而不是铝转子导体，能够使同等电流波动和密度下的损耗得以降低，然而这只是一种非常简单的做法。如果不考虑成本，设计高效电动机不是什么很难的问题。在如今的经济条件下，电动机的采购成本对于消费者而言是一个首要问题。对于那些对使用费用几乎不感兴趣的原始手工设备的生产者更是如此。高效电动机的设计要在效率和产品成本之间寻求一个最佳的平衡，这就是为什么一款设计良好的电动机与其他电动机会截然不同。它不仅使用了更好（更多）的活性材料，而且拥有最佳的几何结构及部件以减少材料成本。影响电动机效率的最后一个因素是生产和加工过程。先进的技术有更少的瑕疵，并且能够允许更小的偏差。在接下来的内容中，一个全面的关于电动机效率技术的话题分为 3 个主要部分：电动机材料、电动机设计与电动机制造。重点是三相感应电动机、工业中重负荷电动机、新

兴的替代电动机技术也将简要提及。

7.3.1 电动机材料

在过去的十年中，高效感应电动机使用了通过增加烟囱直径或是长度来添加额外的活性材料，从而设计的标准定子和转子。铁心中磁性钢越多、定子绕组中铜越多、转子笼中铝越多对损耗的减少相当可观。2004 年以前，铜、铁、铝的价格都相对稳定并且有吸引力。然而，在过去的 5~10 年中，高效电动机开发领域出现了一个大变化，这个变化是由全球经济变化产生的原料价格波动引起的。如图 7.12 所示，只有原料价格和如成品层压钢大约是两个更贵的因素之一。

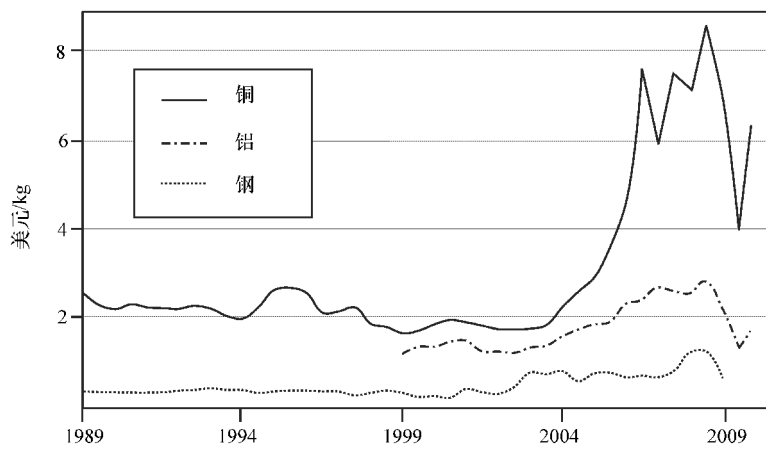


图 7.12 历年感应电动机中原料价格的变化图

表 7.5 表明比较一台 0.75kW 的小型感应电动机在 1999 年和 2009 年的原料成本的变化。原料价格的波动增加了成本，使得高效电动机的发展停滞不前。如今高效电动机成本效益构建的关键是通过原料供应商和电动机设计商之间的紧密合作，来提高材料质量，同时通过最佳设计来控制总成本。少即是多：较少的材料具有更高的质量，提供更好的电动机设计。在下面的内容中将讨论核心材料工艺、永磁体和导体材料的发展与现状。

表 7.5 1999 年和 2009 年 750W 感应电动机材料成本比较

感应电动机 750W	质量 kg	1999 年		2009 年	
		美元/kg	美元	美元/kg	美元
硅钢片	14	0.9	12.6	1.8	25.2
铜线	1.7	4.5	7.65	9	15.3
铝转子	0.5	2.2	1.1	4.4	2.2
材料总成本			21.35		42.7

7.3.1.1 铁心材料

由定子和转子铁心铁磁材料形成的磁路是感应电动机最昂贵的部分。磁路提供了一个低磁阻磁路的磁通。与顺磁性和抗磁材料如建筑钢或先进的电工钢合金相比，铁磁材料的磁导率是 $100 \sim 50000$ 次，甚至更高。因此，励磁电流及需要驱动回路中波动的附属定子铜损将减少。建设钢心材可以建造一个电动机，但由于较高的磁心损耗和相对低的磁导率，这种电动机的效率可能是不高的。由于铁心材料受到交变电场时的磁致伸缩，产生的损耗正比于表面外径的磁滞回线。根据斯坦梅兹方程 [Steinmetz equation, 见式 (7.2)]，这些损耗大约与频率和磁通密度 $B(T)$ 的二次方成正比。在电动机铁心中使用的软磁材料有很窄的磁滞回线，矫顽电强度小于 1000A/m ，从而获得更小的磁滞损耗。涡流损耗是由磁心中的回路感应电流引起的，它正比于频率和磁通密度的二次方。为了减少这些现象，使用一种具有隔离层压的低电导率软磁铁（见图 7.13）。

铁损和铜损是两个相互联系的参量。由电动机产生的机械转矩与励磁电流和磁通成正比。因此，使用良好的导磁材料会增加不饱和磁通密度，可使电动机在更高的磁通密度下运行，并且减小励磁电流和铜损，但是这样却会增加铁损。在磁通（铁损）和励磁转矩产生的电流（铜损）之间可通过最优设计找到一个最佳平衡点。

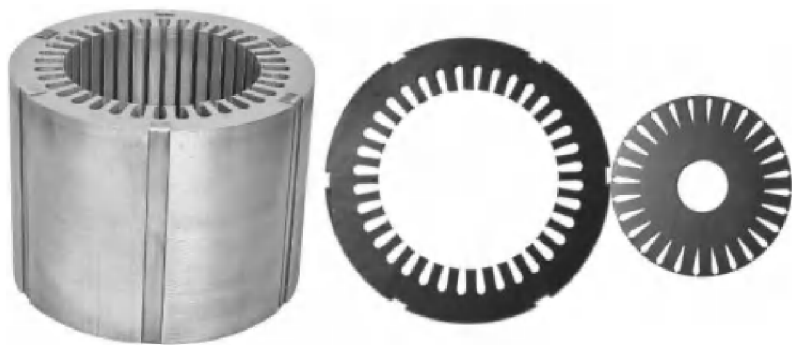


图 7.13 电工钢层压堆叠形成所述定子和转子铁心

变压器铁心中有一个固定的定向磁场，因此使用晶粒取向的软磁材料。然而在电动机铁心中，磁通方向是可变的，因此使用了非取向的软磁材料。根据物质组成的不同，这些材料可以进一步划分为如今电动机中的标准硅钢到更昂贵的合金：

- 1) 硅钢；
- 2) 镍 - 铁、钴 - 铁的合金；
- 3) 软磁复合材料（粉心）；
- 4) 非晶和纳米晶磁性材料。

综上所述，优质的铁心材料有如下特性：

- 1) 高磁通密度（高磁导率）：减小定子铜损；
- 2) 低电导率：减小涡流损耗；
- 3) 软磁性、低矫顽力：减少磁滞。

在过去的 20 年中，在提高高效电动机电工钢质量方面取得了可观的成就。另外大量的革新措施和铁磁材料规范已经给出。

半加工和全加工电工层压钢

半加工电工钢在未退火的条件下用冷轧辊，并且必须进行退火处理，才能冲压叠片以获得最佳的磁性^[25]。经过冲压，叠片通常在 790 ~ 845℃ 的温度退火，脱碳情况下约 1h，再重建其微结构。

退火处理的目的包括：

- 1) 消除冲压；
- 2) 促进和控制晶粒的产生；
- 3) 进一步减少杂质，尤其是碳、氮和硫。

例如，非取向半加工硅钢带 ASTM 码 47S155 有 0.47mm 厚度，并且根据爱泼斯坦（Epstein）框架中在 1.5T 和 60Hz 情况下，测得 1.55W/1b 或 3.42W/kg 损耗。

全加工电工钢的目的是生产一些没有经过退火处理和锻压的层压钢设备。理想的磁性是在加工铁的过程中产生的，因此通常不需要经过转子制造商的额外热处理。显然，在锻压层压钢的过程中，与外部切削刃相邻的材料结构会发生变形，但层压钢使用了这个最优的微观结构。

硅含量

在电磁钢板中加入硅（FeSi₃）是最常见和最有效的手段，这可以降低电导率和涡流损耗。然而，对于高效电动机中的设备，加入硅的作用是有限的，因为它降低了不饱和磁通密度（磁导率）并且增加了机械硬度，而机械硬度的增加提高了模具成本，从而使产品更加昂贵。低电导率和高磁导率通常被视为是不兼容的，但是随着钴和镍钢合金领域的发展，这个问题已经解决了。

层间绝缘

层压片上的绝缘涂层通过将涡流损耗限制在铁心的单独压层中，从而降低铁损。根据绝缘阻抗、耐热性、冲压成型性和可焊性的不同，涂层可分为 C0、C1、C2、C3、C4 和 C5^[27]。小型电动机涂层最常见的是氧化物涂层（C0、C1），这种涂层是自然形成或在冲压叠片的退火过程中形成的。然而，氧化物的层间绝缘不稳定，使得高效电动机的使用不稳定。基本有机涂料（C3）更稳定但是不能承受半加工过程中的锻压高温。在高效电动机中，无机涂层和混合涂层（C4、C5、C6）由于其优良的绝缘一致性、抗热性和耐压性而得以使用^[28]。

分层厚度

更薄的分层具有更小的涡流损耗，却会增加钢材供应商和电动机制造商的成

本。0.5mm 以下的片材很难进行啮合处理和加工。将超薄层板（0.05 ~ 0.2mm）和绝缘层整合到 98% 的封装密度需要特殊的工艺和堆叠技术^[29]。

钴 – 钢合金及镍 – 钢合金

基于钴 – 钢合金及镍 – 钢合金的优质软磁材料具有优良的特性，同硅钢标准相比，它为高效电动机提供了相当大的优势^[30]。钴 – 钢合金具有非常高的磁通密度和磁导率，这使得在相同铁心大小情况下具有更低的励磁电流（铜损），或是在相同励磁电流情况下具有更高的能量密度。镍 – 钢合金不仅具有更低的磁通密度，而且由于其低矫顽力和高电阻率使得损耗更低。表 7.6 给出了典型硅 – 钢和高品位镍合金及钴合金的比较^[29]。

晶粒尺寸

磁性钢的晶粒尺寸对于减少铁损来说至关重要。在机械加工（冲压）过程中，叠片边缘较小的颗粒会使磁滞损耗增加，因为磁畴壁之间的摩擦会更大。更进一步，涡流损耗与晶粒尺寸成正比。尺寸在 100 ~ 150 μm 为最佳^[26]。典型的硅钢在消除应力退火之前尺寸为 30 μm ，之后为 50 μm ，即使这样依然远小于最佳数值。晶粒生长受到晶粒边界相交的小夹杂物的限制。减少小杂物，并通过添加铝和稀土类元素到熔融硅钢中将小杂物粗大化，将在消除应力退火时大大促进晶粒生长（达到 70 μm ）。

表 7.6 硅 – 钢、钴 – 钢、镍 – 钢带材规格比较

	薄板厚度	矫顽磁性	电阻	感应值 ($H = 16$ A/cm)	饱和极化	频率 50Hz (1T) 的损耗
	mm	A/cm	$\mu\Omega\text{m}$	T	T	W/kg
硅钢 (47F165)	0.47	0.2	0.4	1.45	2.03	1.17
钴 – 铁合金	0.2	0.4	0.4	2.25	2.35	0.6
镍 – 铁合金	0.2	0.04	0.45	1.55	1.55	0.23

未来的发展

软磁复合材料（SMC）正被视为经典层压板的替代铁心材料而发展^[31]。SMC 是在一个特定的模型中，将铁粉与环氧树脂或其他有机树脂在压力下粘接而成。粘合剂具有极好的强度和绝缘特性。SMC 一般具有良好的磁特性（磁导率）和低涡流损耗。在高频条件下，由于粘合树脂中颗粒间的绝缘使得这些特性尤为突出，这使 SMC 成为一种在高效电动机的变频器（高频谐波）运行中的有趣材料。然而其主要优势是 SMC 为电动机设计者提供的自由。由于电阻是各向同性的（不像层压片），对设计没有任何强加的限制，这样设计者们可以用一个非常光滑的表面做出复杂的铁心形式。

不定形的磁性材料（AMM）为更多地减少电动机中的铁损带来了潜力。为了

避免通常的平衡结晶结构，并保留类似玻璃的非晶无序结构，合金液组合物迅速淬火在一个非常薄的层（Fe、Co、Ni、Si 等）中形成 AMM^[32]。这种无序原子结构的优点是：由于高阻抗而具有非常低的铁损，在 50Hz 和 1.5T 条件下通常少于 0.2W/kg（硅钢为 2~4W/kg）。由于增加玻璃形成元素（硅）的需要，其饱和度和渗透率仅为平均值，因此必须使用含 AMM 的稍微更大的铁心。AMM 在未来具有生产经济的潜力，但是极薄的仪表脆性（最大为 0.04mm），让 AMM 在切割层压模型和获得良好叠装系数的过程中困难重重。

7.3.1.2 转子导体材料

转子笼中的焦耳损失（ RI^2 ）是一台感应电动机中的第二大损失，鼠笼材料的导电性、横截面积和长度决定了它的电阻和转子中的焦耳损失。对于在大规模生产的转子中高导电性材料的选取与其成本，包括特殊材料，相对便宜的铝和高导电性的铜也是可行的两个选项。感应电动机中，中小型功率的转子笼一般是由铝高压压铸的，因为这样符合大规模生产的低成本、高效益而且具有相当不错的导电性和效率。在过去的十年里，用铜替代铝做转子笼非常流行，满足了通过 MEPS 来提高电动机效率的需求，70% 的更高导电性的铜可以减少焦耳损失从而降低工作温度，再次降低导体电阻，除了以上在效益方面的好处，较低的工作温度可以使用更小的风扇来减少空气摩擦，并且通过经验法则即每减少 10℃ 的工作温度可以额外增加电动机的使用寿命可知，较低的工作温度增加了电动机的使用寿命。

铜转子不是一项新技术，它们实际上是用实心铜条制造的转子笼焊接在端环处的大功率感应电动机的标准。对于大量生产的中小型感应电动机来说，制造铜转子不仅仅要考虑经济上是可行的，铜压铸铜的熔点高更是一个问题。长期以来，这已经成为在铜转子领域取得突破的主要障碍，但已经有很多电动机制造商在这个领域开始工作并努力克服这一困难^[33]。今天，科学技术已经达到了比较成熟的状态，可以提高电动机相当大的效率（见图 7.14）。然而在过去的五年里，由于铜成本的大量增加产生了另一个障碍，故将铜转子成本问题提到重要的议题中。这就是为什么现在市场上铜压铸转子电动机的渗透受到限制。铜转子技术有巨大的能源节约潜力，但关于经济形势的讨论仍然是公开的，最终结果主要还是依靠未来铜价的改革^[34]。

铜压铸的问题与解决

转子叠片和模嵌件放置在压铸机中，液态铜在压力下注入，以填补转子棒和端环的空腔。混合高温被熔化的 1083℃ 的铜和 660℃ 的铝给压铸程序造成了大量的困难^[33]。

1) 热检查：环状模具材料的加热和冷却可以导致热疲劳现象。模具表面含有热熔融铜，而且比模具中心的温度要高，模具表面在较大的拉伸应力下的不平整扩大导致模具开裂或过早失效。在高温下同样会导致钢模具的脱碳和软化。取代传统钢模具而使用高质量的合金（镍、钨、钼），用电阻的预加热器的模具也许是一个不错的解决这些问题的方法。

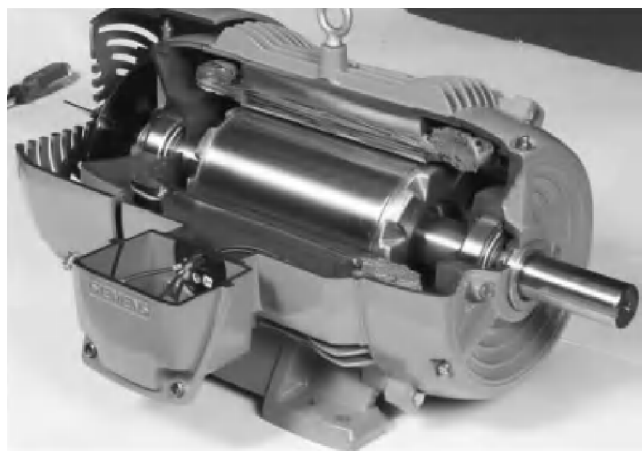


图 7-14 高效率带有压铸铜转子的感应电动机（经西门子公司同意转载）

2) 过热、焊缝或转子叠片退火，可危及材料属性的风险。

3) 铜的氧化熔体。对于少量的铸件，一个镜头的拍摄感应熔炼有利于减少氧气接触。而对于大批量的，在封闭的氮气氛围中进行感应熔炼是很有必要的。

4) 有空隙或者不完整的铸造，产生不平衡的转子和更高的杂散负荷损失。转子的局部粗大孔隙减少了横截面积并且产生了分布在转子中的不均匀电流。在三维流体流动模拟中，最佳的铸造电动机参数及熔体温度可以计算，以减少这些在铸造过程中的夹杂物。

直接替换

最简单的方法是让定子和转子叠片组设计不变，并以铝代替铜。在参考文献[33]中，一台功率为 11kW 的电动机通过这种方法工作效率可以提高 1.2%。较低的转子电阻也会影响电动机的其他特性。图 7.15b 所示转矩 - 速度曲线将发生转移，运行速度将产生轻微上升，降低起动转矩，在高速下转矩被破坏，起动电流上升。用大约 3 倍质量密度的铜 - 铝合金能够明显地提高转子惯性。动态应用程序和电动机性能参数不符合定义中的标准，应当注意的是铜转子电动机容易受到不平衡电压的影响^[6]，我们相信，随着合适的电动机设计的实现，这些消极影响一定能够减少！

转子槽几何形状优化的替换

直接用铜替换铝已经很有效率了，但是如果替代品和包括核心材料的选择、可动部件尺寸以及转子槽的几何形状在内的电动机的重新设计相结合的话，就会有更好的提升可能性。铜条的交叉部分可以设计得更小（从而需要更少的体积），降低材料成本和惰性。降低起动转矩和增加流入电流会提高转子的导电性，但是设计者可以通过调整转子条的形状来改变电动机特性以消除这个现象。关键是最理想的利用转子笼里的高频驱动扩散效应（趋肤效应）^[35]。图 7.15b 显示了用锥形杆槽型典型地用于铝制转子当中，用统一的转子齿宽来最大化导体表面积从而避免磁化饱

和现象。而在图 7.15a 中显示的是用双杆槽型来提高电动机起动时转子的视在电阻，其原理在于转子所看到的电频率大约是线路频率，迫使电流流向具有减小部分的上部起始杆。这些槽型与传统槽型相比会有更高的起始转矩。电动机运行时，转子的频率低而电流主要会流进低电阻的运行杆上。必须要注意的是，当空间和时间的谐波频率经历更高的视电阻率时，负荷杂散损耗也会受槽型的影响，这意味着更大的损耗。

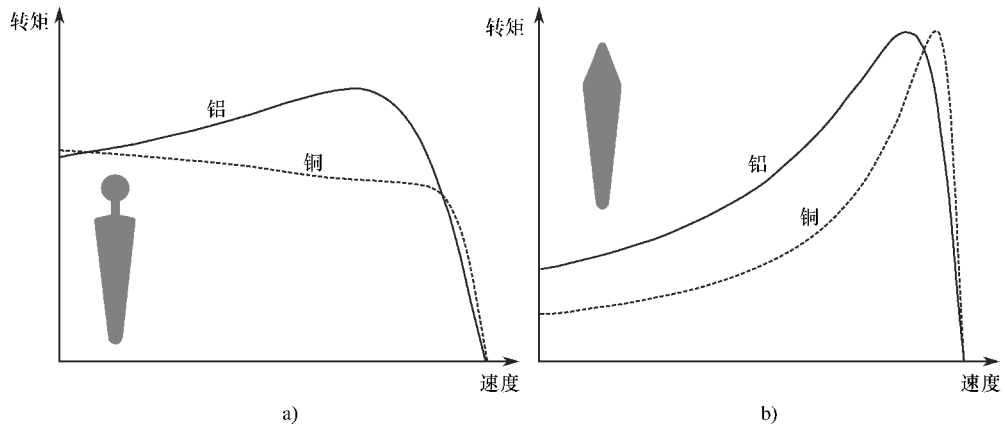


图 7.15 铜 - 铝合金感应电动机转子槽几何形状上的转矩 - 速度特性的影响因素

7.3.1.3 永久磁铁

使用永久磁铁来替换感应电动机上的笼型转子会提供更高的效率。根据定子绕组结构以及补偿电压的波形（梯形波和正弦波），其分别被称为无刷直流电动机（BLDC）或永久磁铁同步电动机。有 3 种常见的永久磁铁材料：

- 1) NdFeB：钕、铁、硼（稀土元素）；
- 2) SmCo：钐、钴（稀土元素）；
- 3) 铁氧磁体：（陶瓷）。

表 7.7 给出了材料之间的属性对比。很显然，NdFeB 的能量密度远比“经典”陶瓷的要高。参考文献 [23] 阐释了电动机的可利用能源几乎根据能量乘积的二次方的变化而变化，这意味着使用 NdFeB 制作的磁铁能构成更加紧密而又轻便的电动机。

表 7.7 磁铁材料的对比

	磁能积	矫顽磁性	剩磁	质量密度
	kJ/m^3	kA/m	T	g/cm^3
钕铁硼	200 ~ 440	750 ~ 2000	1 ~ 1.4	7.5
钐钴	120 ~ 200	600 ~ 2000	0.8 ~ 1.1	8.4
铁氧磁体	10 ~ 40	100 ~ 300	0.2 ~ 0.4	4.5

永久磁铁有很多种形式，这取决于生产制造的技术：

- 1) 熔结/完全致密：可达到的最大能量密度，受限于简单几何图形，易碎。
- 2) 压接：混合磁粉和树脂，简单几何形状，较低能量密度，易碎。
- 3) 注塑成型：复杂几何形状，不易碎，最低能量密度。

直到近些年也有人表示使用高能量密度磁铁（稀土元素）来大规模制造电动机从经济角度上讲不可行的。直到 21 世纪初，导体和核心材料变得相对便宜，而稀土元素磁铁则昂贵（见图 7.12 和图 7.16）。

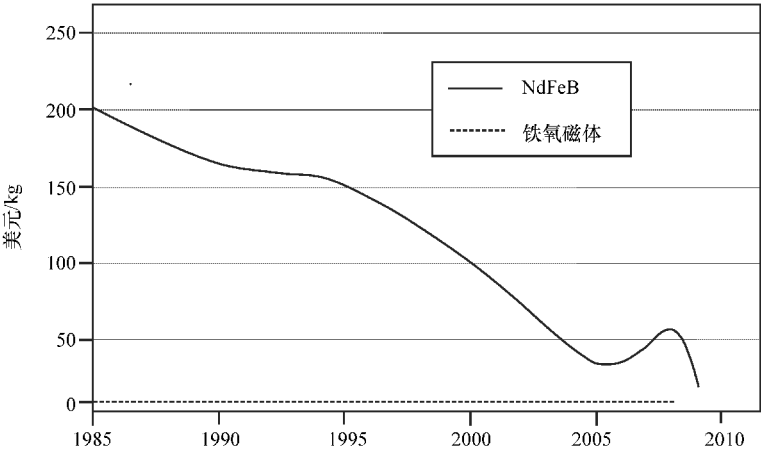


图 7.16 稀土元素（NdFeB）和铁氧磁体永久磁铁材料的历史价格

纵观前十年材料价格的变化，我们可以清楚地看到稀土元素磁铁的价格显著降低，而铜和钢的价格趋势则相反。NdFeB 价格降低，由于它是丰富资源。当然，稀土磁铁供应商对中国市场的依赖会对未来磁铁定价产生风险，因为据预测，永磁电动机的市场份额将继续增加，比如电动车。在同样的输出功率上，永磁电动机的体积相对其他更小，而这个事实也会降低导体和核心材料的需求量。在永久磁铁技术中，有关磁性和热能研究价格的戏剧性降低和技术进步，使得永久磁铁成为了感应电动机的一种有趣的替代品。1999 ~ 2009 年永磁电动机的材料价格对比已在表 7.8 中给出^[23]。

表 7.8 1999 ~ 2009 年的 750W 永磁电动机的材料成本的比较

感应电动机（750W）	质量 kg	1999 年		2009 年	
		美元/kg	美元	美元/kg	美元
硅钢片	6	0.9	5.4	1.8	10.8
铜线	1.1	4.5	4.95	9	9.9
NdFeB 磁体	0.3	100	30	50	15
材料总成本			40.35		35.7

7.3.2 电动机设计

立法规定的电动机效率将在短时间内大幅提高。添加活性物质的方法不能满足这些效率要求，如果不用更大的帧规格（frame size）（轴高度），更不可能满足要求。

此外，电动机的效率不是唯一要符合的设计目标，成本和性能规格同样也是重要的。因此，高效电动机的设计可以被视为一个约束几何和材料参数的优化问题^[36]。

7.3.2.1 定子、转子和空隙几何形状的优化

在过去，对于电动机几何结构的优化设计，执行时，其使用和偏差过程主要依靠设计者的经验和既定的规则。今天，有强大的有限元模型（FEM）软件包工具用于优化设计（见图 7.17）。

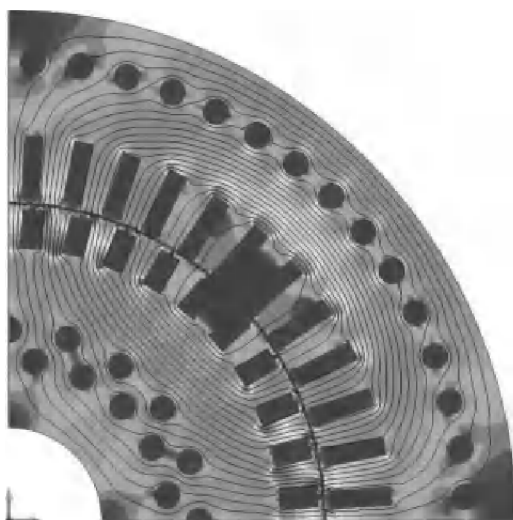


图 7.17 有限元模型的感应电动机的流线和磁通密度分布

用 FEM 工具能够在设计阶段模拟电、磁、电动机的机械和热行为。计算量如流量、电流密度、转矩、温度分布和损失是一个迭代算法的输入，是搜索的最佳几何。优化的目标是在提高效率的同时，降低活性物质的量和保持电动机的性能数据在一个可接受的范围内：

1) 铁心的长度和直径：输出转矩与吸料长度和直径的二次方成正比，而铁损是关于磁通密度的函数。如今优化的 HEM 设计产生的结果是同等或更小的体积有更低的损耗。

2) 转子的几何形状：导电的感应电动机转子条确定转子转差率损失，不考虑起动性能和材料成本，超过 1% 的能耗减少是可能的，倾斜的转子条也经常用于减少转矩脉动引起的空间和时间谐波。

3) 空隙长度：大约 70% 的磁化电流需要通过电动机的空隙，剩下的 30% 因为

叠片钢的磁导率而消耗掉。因此，短一点的空隙将造成磁化电流一定程度上的减少。当然，这将对材料的几何承受和制造技术提出了更高的要求。

4) 定子槽几何：是在降低定子导体电流密度和防止齿轮饱和之间进行的重要优化。此外，通过适当的槽几何学设计减少由于电流通过空隙时被截断造成的槽空间谐波，进而带来的杂质损耗和转矩波动。

一般来说，只有有限的参数是要用算法进行优化的。由于进行优化所需的计算时间与 n^2 成正比（ n 是设计变量的数量），剩下的其他的维数和参数是一个确定的值。举个例子来说，单是一个定子槽的几何优化，就已经有 16 个变量。考虑到现在以及未来的计算机水平，包含所有设计变量的优化几乎是不可能实现的。若只进行部分优化，电动机可达到的最大效率仍然取决于设计工程师的一些基础的设计。FEM 分析的精确度和计算时间的比值取决于细节层次。举个例子来说，若不考虑端绕组的寄生效应，也不使用等价的电路阻抗，二维模型的处理时间将远比三维模型的处理时间短。然而，就建模精确度而言，最大挑战的是铁损。在更大的频率和感应范围内对电动机磁心内时间、空间的谐波损耗进行考虑，需要叠片钢涡流损耗和磁导率的数据。然而，叠片钢样本在 Epstein 框架下测试的环境和安装在电动机里工作时的环境是大不一样的。列表数据大部分只能在某一固定频率、恒定温度及正弦激励的情况下得到。而且，制造的步骤将会改变局部的磁性，这更增加了模拟和测量之间的差别。

7.3.2.2 定子绕组布局

在电动机中添加更多的绕组材料会降低线圈的电阻，因此同样也会降低定子铜损。然而，铜导线截面积或额外绕组的增加将给传统的垂直轴电动机定子槽带来空间的问题。在老式的高效电动机设计中，增加定子槽的宽度和高度为多余的铜线提供空间。因此，铁心的长度和直径必须增加使得磁通密度和铁心的阻力相等。这对于轴向磁通电动机并不是问题，因为它可以在不影响磁感应线的情况下增加绕组。考虑到多层钢的成本，一个解决方法是：在维持开槽的几何形状下，增加填充的绕组数量或者使用更先进的绕组技术。通常可以使用更细的导线或者将槽隔离开来。在绕组设计中，另一个关键因素是缩短绕组长度。因为对小型电动机而言，可能最多有 40% 的绕组是没有效率的。一般的开槽轴向电动机中，通常会有一个额外的绕组，它通过使用多层、向心的绕组来缩短绕组长度。对开槽电动机而言，使用分开的铁心是一项创新技术。这项技术使用几块独立的冲压层压钢作为轴向铁心，每一个铁心对应着一个独立的绕组，这使得电动机运行有更高的效率。到目前为止，这项技术主要应用在低压电动机上，因为它的制造成本还是很高的^[23]。

接下来我们讨论的是前面提到的电阻损耗。定子绕组的结构直接影响了谐波损耗（杂散损耗）。空间谐波产生于绕组在铁心的分散结构，时间谐波产生于非正弦的情况。扩散效应导致了这种损耗。全距、非分散式的绕组（杂散损耗）产生了大量的第 5 种和第 7 种弦波，这对电动机的表现造成了极大损害。通过使用多层向

心（绕组的宽度等于极距）和分散式的绕组，这些弦波被抑制了。

7.3.2.3 散热设计

对一台空气冷却的高效电动机而言，散热设计和机械、电力设计一样，极为重要。散热主要通过热传导、热辐射来进行，对它的分析依赖于 FEM——专用于分析热量在机械节点分布的工具。定子和转子的热传导是这一分布的函数。在一台 3.7kW 的电动机上，降低 10℃ 可以使它的运行效率提高 0.25%^[40]。这可以通过降低电动机效率的损耗来做到。下一步是将热量从电动机外壳传至空气中。外壳和铁心之间拥有良好的热传导是必须的，这需要对两者进行精确地设计。另一种可能是灌封，使空气充满这个结构，同时隔绝电流和传导热量。外壳的材料和冷却的结构也很重要。举例来说，铝结构比铁结构传热更好。下一步是再一次地提高风扇的质量，这里存在一个温度升高和风阻损失增加的权衡取舍。但必须注意到，一些小型 HEM 运行得如此之好以至于它并不需要风扇。对于大型电动机而言，有必要使用一台高性能的风扇。

7.3.2.4 轴承

轴承的摩擦损耗是能量损耗中较小的一部分，但通过这里来改进效率较为容易。轴承的制造商提供了高性能的深沟球轴承，与普通轴承相比，它可以提高 30% ~ 50% 的效率^[41]。对于一个四极 7.5kW 的电动机而言，这大概是 100kWh/年。这些回报值得投资：

1) 非石油合成的润滑油在锂或其他材料上表现更好，持续时间更长，可以承受更高温度。维护也十分重要，过度润滑和润滑不足都会导致效率损耗。

2) 低摩擦的陶瓷球轴承是一项有前景的创新技术，它们温度更低，并且寿命更长。

3) 对一般电动机而言，附件最少必须达到 IP55 所提到的要求。密封轴承油的摩擦损耗更高，特别是对小型电动机而言。另一方面，它们的维护间隔更长，因为润滑油不会散失。

4) 摩擦与轴承大小成比例。对一些设施而言，我们可以减小轴承大小。但对于轴负载之类（比如传动带），尺寸存在一定限制。在高效电动机中，选择合适大小的轴承十分重要^[24]。

7.3.2.5 替代电动机技术

工业电动机（IM）仍然是工业动力，并且它代表所有列装的定速和变速通用电动机^[42]。IM 是一项便宜、强劲和高效的成熟技术，当材料、设计和制造技术优化升级后电动机将超过 IE3 的水平。然而现有的和未来的电动机市场在操作效率、功率密度、低费用和可靠性方面展现了很高的价值潜力^[43]。在费用合理的限制下，现有通行的技术在提高能效上已经达到了物理极限。其他的技术像永磁同步电动机（PMSM）或开关磁阻电动机（SRM）已在考虑之中（见图 7.18）。

SRM 在变速牵引操作中是一个可替代方案，比如在电动或混合动力汽车中，

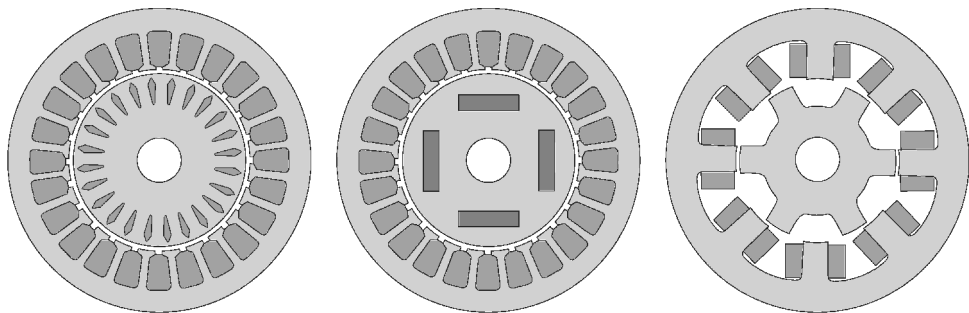


图 7.18 三种交流电动机驱动技术（从左至右依次为感应电动机、PMSM 和 SRM）

它只有一个简单的转子结构并且很高效。每一个电动机相位由两个绕有集中励磁绕组的对立的定子磁极组成。SRM 的每一个电动机相位中都要求装一个变流器单元。当电动机相位通有直流电流时，带电的定子磁极将会拉动另一个没电的定子磁极使之一起带电，就这样交替使磁路中的磁阻最小化。这样的运转原理同样存在于固有的振动、噪声和相关的转矩波动中。而且，要顺利操作 SRM 需要复杂的控制开关和能够反馈成当前波形剖面的准确位置^[44]。这也许就是 SRM 技术在现有的通用电动机标准框架下还不能替代 IM 的原因，但是还是应用在了一些特殊变速用途中，因为它可以充分利用它的全部优点。

另一个更有前景的技术并且在现有通用电动机标准框架下占有一席之地的是 PMSM。通过各自为矩形或正弦曲线的电流波形来区分是无刷直流电动机还是 PMSM。PMSM 和感应电动机的转子有相同的布局，都有一个三相位的分散式或集中式的绕组。

PMSM 有许多优于 IM 的优点：

1) 高效率：定子中的永磁补充了磁通量，定子绕组中没有起磁电流，转子中也没有诱导电流，这样减少了相应的铜损。而且，由于是同步操作，磁通变化引起转子中心的铁损为零，除了谐波。更高的功率密度：损耗的减少和相应更低的热量散发使我们可以增大转子绕组电流来获得更大的输出转矩，并且可以保证运行温度不会太高。用更小的结构来传送同样大的输出也是可能的，可以有效地减小 PMSM 的重量和体积。

2) 高能量密度：减少损失和相应的低热量的产生可以增加定子电流、保持相同的操作温度、得到更高的输出转矩。它可以在较小的帧时提供相同的输出，大大减小了 PMSM 的重量和体积。

3) 更大的速度范围和连续功率：PMSM 在所有的速度范围内都比感应电动机更有效，尤其在低速情况下。低速状态下损耗的减少可以抵消制冷系统带来的效率损耗，所以在所有的速度范围内可以有连续的转矩。

4) 维修：轴承运转温度低，延长了使用寿命和润滑间隔。

5) 惯性：减轻转子重量能对动力性能有好处。

PMSM 技术不是新技术，在低速、大输出转矩的电动机和少数的牵引电动机中

应用得越来越多。先进的性能相对消耗地球稀有的永磁物质（NdFeB）的利用率很高，高效和功率密度值得消耗这些磁性物质资源^[43]。目前，好几家主要的电动机生产商使这项技术满足了所有的标准框架下的各种速度的应用，它已成了 IM 的一个替代品。效率的提高（见图 7.19）使得电流额外利用率超过了 2%（IE3），并且很容易地达到了 IE4 的标准。

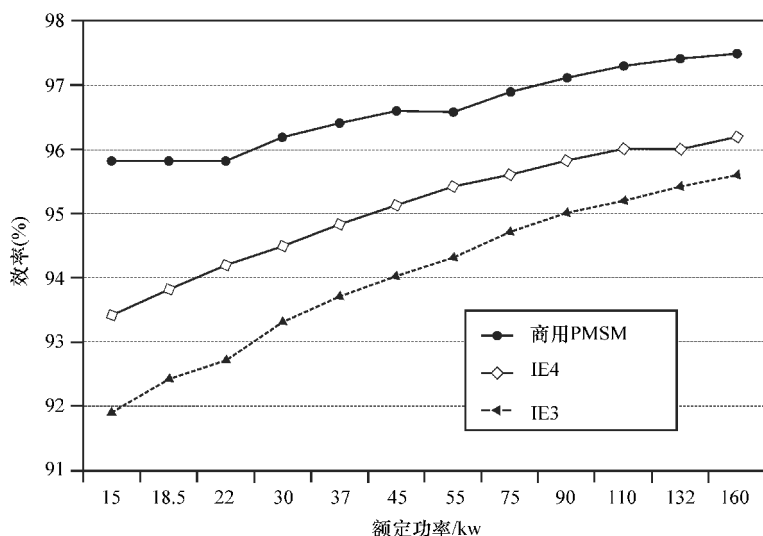


图 7.19 商用 PMSM 范围（两极）与 IE3 和 IE4 MEPS 级别效率的比较

PMSM 的缺点在于不能与输电网连接，甚至定速运用也不行。它需要具有磁场定向控制的变换器，这种变换器在定速应用中可以增加损耗和费用。在这种情形下，线路起动 PMSM 是一个良好的解决方法。事实上，具有永久磁性的 PMSM 混合体在与输电网连接时提供最初以及加速的转矩，这种混合体在转子表面与鼠笼连在一起。当与输电网同步达到一定频率时，发动机运转没有差错，装载量不变并且鼠笼也不会产生任何损耗。效率比高效率发动机好 1% ~ 2%，但功率密度大约相等，因此它们会以相同水平框架大小出现。大型制造厂商会提供这种技术，很明确的是，它旨在降低到中等功率范围，在定速运用中直接代替感应电动机。也可以进行变速控制，但是由于鼠笼内开关谐波引起的损耗，效率会有所降低。

7.3.3 电动机制造

紧接着到材料和设计创新，电动机设计者现在也转向生产工厂以寻求更高的电动机效率。制造和建造技术对最终产品的效率有巨大影响。一台电动机可以用高质量材料设计出，但制造必须在同一质量水平下才能获得高质量的最终产品。这需要制造工程师和设计工程师在生产阶段以及厂房、工具加工和制造部门培训投资整个质量管理体系中的紧密合作。限制生产公差（production tolerance）进而限制效率频带是十分重要的。过去，设计者通常通过增加补充材料获得足够的“缓冲器”来补充由于生产导致的效率偏差。考虑到现在的成本效率要求，现在这不再是一种可用的方法。近年来，许多损耗增加的制造过程已经被修正和改善，使得设计者可

以减少像以前那样加材料来允许这些变化。

7.3.3.1 铁心制造

磁性钢供应者保证在未加工的钢条 Epstein 框架测试中产品的损耗和渗透,但当材料变成电动机磁心后,性质会显著衰减。“加工铁损”是因为在电动机磁心加工中叠层钢遭受了机械和热量压力。铁损耗可能加倍,但通过合适的加工过程,其影响可能最小化。

1) 第一种可能的压力源是在薄金属片上的切削加工。钢的微观结构受到影响(更小的晶粒),导致在距离边界 $1 \sim 6\text{nm}$ 范围中渗透性的局部减小和 $5\% \sim 30\%$ 的滞后损耗的增加^[45]。许多不同的切削工艺在铁损中的效果不同^[46]。激光切削通常用于小批次的原型或特殊机器。由于材料边缘受高温影响而被认为是一种最差的工艺。冲切是最常用的技术,导致叠层材料受压能级高。但是,当冲切工具二次打磨并结合释压退火以防磨石和过度压力而保持良好状态时,其影响将被减至很小。最好的技术反倒是用非常低的机械和热影响材料的电火花腐蚀。

2) 在焊接、螺栓或半切连锁下,铁心叠层堆在轴向压力下被压在一起^[47]。压力应当最小化,同时焊接螺栓应当位于流量密度低的重要位置上。

3) 定子铁心通常因其在外壳的收缩受很大的径向力影响,这应当减至最小。

7.3.3.2 定子绕组

对于定子绕组,高槽填充物和短紧端圈对于减少欧姆损耗十分重要,但它们更难安装和隔热。自动线圈机通常产生随机线圈,导致相对低的填充和松散的端圈。能够在特定几何形状的槽中产生高密度线圈的机器是有必要的。另一个可能提高槽填充率的方法是减少线圈的绝缘体积,使 0.8mm 导体代表 12% 的代表面积^[28]。这需要对更小厚度有相等绝热值材料的改进。

7.3.3.3 转子压铸

铝或铜笼型转子压铸是很重要的一个过程,槽填充、端环和材料的纯度(空气或污垢内含物)都是影响转子损耗的重要因素。而且,铸造导体棒在叠层间形成桥,使绝缘层短路。这使得附加杂散负荷损耗和涡流损耗增加。通过利用钢和铝或铜的不同收缩速率,压铸后在冷水中淬火会使两者分离^[28]。但更好的方法是在铸造前将绝缘层用于转子槽。

7.3.3.4 几何公差

高效电动机通常都是用更小的空隙设计。为阻止因离心而产生的振动甚至爆炸,制造和组装各部分将对几何公差的要求更高。为确保空隙向心,通常要调节电动机距轴中心的尺寸^[28]。风险存在于:若加工条件不足,叠层为了形成导电表面,在叠层上粘在一起。如果没有采用预防措施,因空间表面效应和时谐而造成的表面高频率的转子表面损耗将会加倍。对更小的电动机,最好的解决方案是增加穿孔操作的准确性,因此叠层可以直接冲击出合适尺寸。对更大的电动机而言,这不合适,而且要避免或消除粘接。结构和轴承端盖公差将变得更紧以保证外罩内表面和轴承座间的向心力。

参考文献

- [1] H. De Keulenaer, R. Belmans and E. Blaustein, *Energy Efficient Motor Driven Systems. Can Save Europe 200 Billion kWh of Electricity Consumption and over 100 Million Tonnes of Greenhouse gas Emissions a Year?*, European Copper Institute, Brussels, Belgium, 2004.
- [2] P. Bertoldi and B. Atanasiu, *Electricity Consumption and Efficiency Trends in the Enlarged European Union – Status report 2006*, European Commission, DG TREN, Joint Research Centre and Institute for Environment and Sustainability, 2007, p. 66.
- [3] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira and J. A. C. Fong, Standards for efficiency of electric motors, *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, **17**, 2011, p. 8.
- [4] A. A. Jimoh, R. D. Findlay and M. Poloujadoff, Stray losses in induction machines: Part I, Definition, origin and measurement, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-104**, 1985, pp. 1500–1505.
- [5] A. A. Jimoh, R. D. Findlay and M. Poloujadoff, Stray losses in induction machines: Part II, Calculation and reduction, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-104**, 1985, pp. 1506–1512.
- [6] W. Deprez, *Energy Efficiency of Induction Machines: A Critical Assessment*, KU Leuven, 2008.
- [7] H. Auinger, Efficiency of electric motors under practical conditions, *Power Engineering Journal* see also *Power Engineer*, **15**, 2001, pp. 163–167.
- [8] H. Auinger, Determination and designation of the efficiency of electrical machines, *Power Engineering Journal* see also *Power Engineer*, **13** 1999, pp. 15–23.
- [9] P. Pillay, P. Hofmann and M. Manyase, Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over or undervoltages, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, **17**, 2002, pp. 485–491.
- [10] S. Van Haute, A. Malfait, R. Reekmans and R. Belmans, Losses, audible noise and overvoltages in induction motor drives, *III Power Electronics Specialists Conference*, Atlanta, Georgia, 1995.
- [11] F. J. T. E. Ferreira, P. Pereirinha and A. T. de Almeida, Study on the bearing currents activity in cage induction motors using finite-element method, *i ICEM 2006. XVII International Conference on Electrical Machines*, Chania, Crete, Greece, 2006.
- [12] B. Bolsens, J. Knockaert, J. V. d. Keybus and R. Belmans, Common-mode poles and eigenmodes for various grounding configurations in motor applications with variable speed drives, *16th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2004)*, Cracow, Poland, 2004.
- [13] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari and M. Pastorelli, International standards for the induction motor efficiency evaluation: a critical analysis of the stray-load loss determination, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **40**, 2004, pp. 1294–1301.
- [14] W. Deprez, Understanding the pitfalls between efficiency measurement standards and the practical performance of motor driven systems (invited paper), *Journades Europees d' Energia a l'ITSEIB* Barcelona, Spain, 2007.
- [15] B. Renier, K. Hameyer and R. Belmans, Comparison of standards for determining efficiency of three phase induction motors, *IEEE Transactions on Energy Conversion (IF 0.360)*, **14**(3), 1999, pp. 512–517.
- [16] A. Nagornyy, A. K. Wallace and A. V. Jouanne, Stray load loss efficiency connections, *Industry Applications Magazine, IEEE*, **10**, 2004, pp. 62–69.
- [17] P. Van Roy and R. Belmans, Assessment of efficiency of low voltage, three phase motors, *Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS'02)*, Treviso, Italy, 2002.
- [18] A. T. de Almeida, *European Ecodesign Directive on Energy – Using Products (EuPs) – Project: Lot 11 Motors*, 2006.
- [19] P. Angers, Comparison of existing standard methods of determining energy efficiency for three-phase cage induction motors, *EEMODS'09: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, Nantes, France, 2009.
- [20] W. Deprez, J. Lemmens, D. Vanhooydonck, W. Symens, K. Stockman, S. Dercyne and J. Driesen, Iso efficiency contours as a concept to characterize variable speed drive efficiency, *XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2010, pp. 1–6.
- [21] M. Doppelbauer, Guide for the selection and application of energy-efficient motors, *EEMODS '09: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, Nantes, France, 2009.
- [22] A. I. de Almeida, C. U. Brunner, P. Angers and M. Doppelbauer, Motors with adjustable speed drives: testing protocol and efficiency standard, *EEMODS '09: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, Nantes, France, 2009.
- [23] J. Petro, Cost-effective construction of high efficiency motors, *EEMODS*, Nantes, 2009.

- [24] J. Malinowski, J. McCormick and K. Dunn, Advances in construction techniques of AC induction motors: preparation for super-premium efficiency levels, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **40**, 2004, pp. 1665–1670.
- [25] Copper Development Association, Copper Motor Rotor Project, 2010.
- [26] M. Takashima, N. Morito, A. Honda and C. Maeda, Nonoriented electrical steel sheet with low iron loss for high-efficiency motor cores, *IEEE Transactions on Magnetics*, **35**, 1999, pp. 557–561.
- [27] M. Lindenmo, A. Coombs and D. Snell, Advantages, properties and types of coatings on non-oriented electrical steels, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, pp. 79–82.
- [28] D. Walters, Energy efficient motors saving money or costing the earth? Part I, *Power Engineering Journal*, **13**, 1999, pp. 25–30.
- [29] Vacuumschmelze, Application notes: VAC alloys for motor and generator applications, 2010.
- [30] E. Krol and R. Rossa, Modern magnetic materials in permanent magnet synchronous motors, *Electrical Machines (ICEM)*, 2010 XIX International Conference on, pp. 1–3.
- [31] G. Cvetkovski and L. Petkovska, Performance improvement of PM synchronous motor by using soft magnetic composite material, *IEEE Transactions on Magnetics*, **44**, 2008, pp. 3812–3815.
- [32] L. A. Johnson, E. P. Cornell, D. J. Bailey and S. M. Hegyi, Application of low loss amorphous metals in motors and transformers, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-101**, 1982, pp. 2109–2114.
- [33] *Technology Transfer Report – The Die-Cast Copper Motor Rotor*, Copper Development Association and International Copper Association, April 2004.
- [34] A. Boglietti, A. Cavagnino, L. Fecaris and M. Lazzari, Energy-efficient motors, *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, **2**, 2008, pp. 32–37.
- [35] J. L. Kirtley, J. G. Cowie, E. F. Brush, D. T. Peters and R. Kimmich, Improving induction motor efficiency with die-cast copper rotor cages, *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, 2007, pp. 1–6.
- [36] J. F. Fuchsloch, W. R. Finley and R. W. Walter, The next generation motor, *Industry Applications Magazine, IEEE*, **14**, 2008, pp. 37–43.
- [37] D. G. Walters, I. J. Williams and D. C. Jackson, The case for a new generation of high efficiency motors—some problems and solutions, *Electrical Machines and Drives, 1995. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 412)*, 1995, pp. 26–31.
- [38] A. M. Knight and C. I. McClay, The design of high-efficiency line-start motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **36**, 2000, pp. 1555–1562.
- [39] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. M. Ionel, M. Popescu, D. A. Staton and S. Vaschetto, A general model to predict iron losses in PWM inverter-fed induction motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **46**, 2010, pp. 1882–1890.
- [40] M. K. Yoon, C. S. Jeon and S. K. Kauh, Efficiency increase of an induction motor by improving cooling performance, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **17**, 2002, pp. 1–6.
- [41] M. Janssens, SKF Energy Efficient deep groove ball bearings for higher driveline efficiency, *EEMODS*, Nantes, 2009.
- [42] X. Feng, L. Liu, J. Kang and Y. Zhang, Super premium efficient line start-up permanent magnet synchronous motor, 2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 1–6.
- [43] M. Melfi, S. Evon and R. McElveen, Induction versus permanent magnet motors, *Industry Applications Magazine, IEEE*, **15**, 2009, pp. 28–35.
- [44] Z. Q. Zhu and D. Howe, Electrical machines and drives for electric, hybrid and fuel cell vehicles, *Proceedings of the IEEE*, **95**, 2007, pp. 746–765.
- [45] L. Vandenbossche, S. Jacobs, F. Henrotte and K. Hameyer, Impact of cut edges on magnetization curves and iron losses in e-machines for automotive traction, 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, Shenzhen, China, 2010.
- [46] W. M. Arshad, T. Ryckebusch, F. Magnussen, H. Lendenmann, B. Eriksson, J. Soulard and B. Malmros, Incorporating lamination processing and component manufacturing in electrical machine design tools, *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*, 2007, pp. 94–102.
- [47] D. Miyagi, K. Miki, M. Nakano and N. Takahashi, Influence of compressive stress on magnetic properties of laminated electrical steel sheets, *IEEE Transactions on Magnetics*, **46**, 2010, pp. 318–321.

第 8 章 照 明

Mircea Chindris 和 Antoni Sudria – Andreu

目前，高效的照明有助于节能减排。用于照明系统的电能是总电能消耗的一个重要部分：在全球工业化国家中占 5% ~ 15% 的全国电能消耗，在一些发展中国家甚至高于 80%。2003 年，人工光源消耗约 650 百万 t 油当量的重要能源，占全球总能源消耗的 8.9%^[1]。因此，照明相关的 CO₂ 排放量估计在 1900 万 t，大约相当于全球 CO₂ 排放量的 8%。即便有些数据不准确，但仍然能反映照明存在的问题。

另一方面，前后的照明技术仍然在广泛使用，尤其是在住宅领域。根据参考文献 [2]，所有安装在欧盟国家的灯具中，2/3 是低能效的（欧盟国家的家庭中，约 85% 的灯能效低）；在英国，估计有 3.75 亿只白炽灯还正在住宅中使用，约占总灯具数的 60%^[3]。

同时，即使是针对现有技术，照明行业的节能潜力仍是很高的。事实上，根据相关文献，平均发光效率约从 20 世纪 60 年代的 18lm/W 到 2005 年的 50lm/W，发光效率增量相当明显。然而，在所有照明应用中并不是统一的，在住宅领域提高到 20lm/W，商业部门提高到 50lm/W，工业部门提高到 80lm/W。当其他照明技术涌现在市场上时，照明应用呈现了大规模实施高效照明技术提高能源效率措施的一个好目标。这些提高能源效率措施可以提供合适照明的解决方案，并具有如下巨大优势^[4]：

- 1) 客户：节约能源，降低费用；
- 2) 公共设施：减少峰值负荷，减少资本需求，降低供电成本；
- 3) 政府：减少财政赤字，减少政府公共支出，提高能源安全；
- 4) 环境：减少当地的污染和温室气体的排放量。

在照明方面，能源效率定义为在不牺牲照明质量的情况下优化能源消耗。虽然照明电能消耗是一个重要的问题，以能源效率为基础的减少光照有效性是严重倒退，从长远来看将适得其反。因此，照明必须解决的问题是如何在保证最佳照度的同时，消耗最少的电能^[5]。这个问题正确的解决方案包括：准确选择照明水平、适当选择灯具、设计与选择合适的控制系统。此外，还需考虑在特定环境或场所目前使用照明系统的集成问题。

8.1 能源和照明系统

8.1.1 照明系统中的能源消耗

参考文献 [6] 综合分析了照明系统中的能源消耗问题。根据这篇报告，2005

年全球范围内安装电灯超过 330 亿只, 每年消耗电能大约 2650TWh (占全球电能消耗的 19%, 或稍超过欧洲 OECD 的总体电能消耗); 该电能消耗的有一半属于 IEA 成员国, 但是他们的份额正在减少; 到 2030 年, 非 OECD 国家预计将占用超过全球照明电能需求的 60%。包括能源、照明设备和劳务在内的年费用为 3600 亿美元, 约占全球 GDP 的 1% (电能消耗大约占这项费用的 2/3)。

与照明相关的 CO_2 排放总量估计为 19 亿 t (相当于世界轻型客车排放的 70%), 即全球矿石燃料消耗和燃烧所释放的 CO_2 的 7%。

室内照明消耗的电能在三产业电能消耗中比例最大; 平均来说, 照明占了第三产业电能消耗的 45%、OECD 国家住宅消耗的 14% (在非 OECD 国家, 这些份额更高; 在全球范围内, 这些份额为住宅消耗的 31%、商业消耗的 43%)。户外固定照明 (主要包括街道、车行道、停车场、建筑照明) 少于总体照明电能消耗的 1/10 (约 8%), 然而大约 490TWh/a 的电能被工业照明消耗 (共计大约占总体照明电能消耗的 18%、略大于总体电能消耗在工业领域的 8.7%)。

另一方面, 根据参考文献 [7], 全球照明电能消耗如下: 住宅领域大约 28%, 服务领域为 48%, 工业领域为 16%, 街道和其他照明领域为 8%。其他关于 EU-27 能源消耗在参考文献 [8]、[9] 中有比较详细的介绍。在 2007 年, 照明占了总电能消耗的 10%, 在住宅领域有着最重要的分量 (它是位于加热、制冷之后的第三个主要电能消耗大户) 占 10.5%, 第三产业办公室占 21.6%, 街道照明占 4.7%; 在工业领域, 照明电能消耗一般不多于 5%^[10]。

在美国, 照明系统大约消耗所发电能的 20%^[11], 或者美国总体能量消耗的 30%^[12]; 在日本, 大约所发电能的 14% 被照明消耗^[13]。人造光的需求与人均 GDP 紧密相连, 但是不同经济体之间有着明显的差异。参考文献 [6] 以流明时为单位阐述了 2005 年人均电灯消耗的估计值, 北美: 101Mlmh; 欧洲: 42Mlmh; 日本/韩国: 72Mlmh; 澳大利亚/新西兰: 62Mlmh; 中国: 32Mlmh; 前苏联: 32Mlmh; 其他国家: 8Mlmh (例如印度, 仅使用 3Mlmh)。

在过去的十年中, 全球对于人造光的需求以每年 2.4% 的平均速率增长, 在 IEA 国家中的增长速率 (1.8%) 低于其他国家 (3.6%)。随着当前经济和能源效率的趋势, 预计全球对于人造光的需求到 2030 年将增长 80%, 而且分布不均匀。按此计算, 在照明技术没有突破性进展的情况下, 全球照明电能需求将达到 4250TWh。此外, 若没有采取其他能源效率政策措施, 到 2030 年, 与照明相关的年 CO_2 排放将上升至近 30 亿 t。

8.1.2 照明系统的能源效率

根据参考文献 [14], 照明系统的能源效率被定义为在没有牺牲照明质量条件下的能源消耗的优化, 它的实施包括周全的设计理念, 选择合适灯具、照明设备、控制系统以及合理的照度等级 (照明环境或空间的整体意识必须考虑)。能源效率的目标是建立一个能源高效、照明有效的照明系统, 同时兼顾照明系统费用和能源

消耗两者之间的关系。每个照明场所有不同的照明需求，在确保合适的视觉感知前提下必须考虑下列因素：①照明等级；②视觉领域的亮度；③刺激性反射（强光）的缺失；④显色性。因此，最合适的照明技术随环境而改变，最好的照明实践水平取决于应用。

另一方面，对于不同照明方案的经济评估，需建立一个生命周期费用分析，通常只考虑初始费用（投资）^[15]。人们往往忽略了包括能源、灯具替换、清理维修费用在内的费用。在照明设备整个生命周期费用中消耗费用通常是最大部分。在未来，照明的费用计算将包括初始投资和能源消耗、维修等运行费用。

幸运的是，基于现有技术，照明设备的能源效率具有巨大的提升空间。提高照明系统效率的基本步骤如下^[11]：

- 1) 确认在完成视觉感知任务条件下的所必需的照明数量和质量。
- 2) 照明空间频繁被使用时，提高光源效率。
- 3) 照明空间不频繁被使用时，优化照明控制。

第一步，确认合适的照明数量和质量，这对于每一个照明空间来说都很重要，有时第二、三步是可选项，能够被单独或者一起考虑；这些都能够实现，但是通常这两个选项在经济上相互排斥。

第一步在照明改造中非常重要：在照明改造过程中，第一步经常被忽视，因为大多能源管理者尝试着保持与旧系统相同的照明等级，即使是过度照明或者包含许多强光源也是如此。不幸的是，虽然国际标准推荐的等级持续性下降，现在还有许多空间是过度照明的。通过简单地重新设计一个照明系统来得到合适的照明等级，能源管理者能够获得惊人的能源节约回报。

第二步，考虑照明系统组成部分的效率问题，包括灯具、镇流器、照明设备。从这个观点来说，提供效率仅意味着一个更好的全局照明效力（照明系统每瓦得到更多流明）。这个目标可能通过提高能源效率、替换电感镇流器（用更有效率的型号或用电子镇流器）或者提高固定装置效率来实现。提高光源的效率是最受欢迎的选择，因为若新系统与老系统相比，消耗更少的能源，能源节约能够多少得到保证。然而，这个能源标准应当与其他照明设计标准相兼容：在许多应用中，光学特性（色温、彩色再现指数、光强分布曲线等）经常作为主要的标准，灯具效力可能成为一个次要的考虑因素。

最后，第三步目的是实施一系列控制技术，以减少当系统运行时消耗的能源，或者关闭不需要的人造光系统。然而，若控制系统的使用太昂贵，强调影响用户行为能带来重要的能源节约也是十分重要的。

从另一方面来说，当解决照明设备的能源效率问题时，对于其他问题的关注也十分重要，如将直接光引至需要照明的地方，或者使用反射性房间表面。

总结来说，能源高效、照度有效的照明系统将^[14]：

- 1) 提供高水平的视觉舒适度；

- 2) 利用自然资源;
- 3) 为照明定向提供最好的光照;
- 4) 提供灵活的控制方式;
- 5) 低能耗需求。

在老旧的、过度照明的建筑中,节约能源和提高照明质量的可能性很大,这些老建筑使用能源效率低的照明技术,或者照明设备所在位置不合适造成能源费用很高,同时这些地方的照明系统无法控制,通常彻夜开灯。除了业主的经济动机外,推行高效照明系统还需要政策的支持以达到如下目标^[6]:

- 1) 逐步淘汰或者极大地减少低效率电灯和控制装置;
- 2) 鼓励采用高效照明设备,抑制使用低效照明设备;
- 3) 鼓励使用合适的照明控制;
- 4) 确保设计的照明系统提供合适的依据国家或国际标准的照明等级;
- 5) 激励更好的照明设计实践促进照明工作,单独用户控制照明需求和动态利用日光而不是统一使用人造光源;
- 6) 鼓励更大、更多的建筑环境智能利用日光,带来能源、健康与产量的优势;
- 7) 减少灯光污染,尤其是对于室外应用来说;
- 8) 激励新的、更有效的照明技术的发展和尽早投入使用;
- 9) 解决有效照明的市场障碍,重视生命周期内全部的费用,减少对初始投资费用的过度强调;

10) 保护用户避免购买低质照明部件,例如低质量紧凑型荧光灯(CFL)和线性荧光灯(LFL),这些设备的寿命、照明输出或效率并不符合其声称值。

据欧洲灯具公司联盟所说,安装在欧洲的所有灯具技术中,超过50%的灯具并不是最节能的^[2]。因此,对于欧洲来说,提升节约能源的空间还很大。这些节约的大部分(大约为75%~80%)在专业照明领域能够得到实现(例如街道和办公室),由于这个原因,公共部门起着开先例和通过绿色采购来影响市场的重要作用。绿色采购是欧洲控制能源消耗的重要要素。欧洲国家每年在公共采购上花费占欧盟GDP的14%~16%,通过购买能源效率高的技术产品,例如现代灯具或镇流器等,合理使用这些资金能够推动节约能源消耗。虽然总体来说,这个设备开始时很昂贵,但是后期在电能消耗、维修和处理这些设备方面的费用将节省很多。

8.2 规定

不同的照明指导原则对照明总量的影响非常大,根据总体照明能源,出台了国家和国际层面上的照明指导原则。在过去的80年,照明指导原则已经发生了很大变化,但对照明的能源需求,各管理部门仍然有分歧^[6]。欧洲主要的标准和指导

原则如下：

- 1) EN 12665：光源与照明。照明要求的基本术语和标准。
- 2) EN 12464 - 1：光源与照明。室内工作场所照明。
- 3) EN 13201 系列：道路照明。
- 4) EN 13202 系列：光源与照明。测量和表示灯与灯具的照度数据。
- 5) EN 60598 系列：灯具。
- 6) EN 61000 - 3 - 2：电磁兼容性。限制。谐波电流发射限值（设备每相输入电流 $\leq 16\text{A}$ ）。
- 7) prEN 15193：建筑物能源性质。照明能源要求。
- 8) 2006/32/EC 指导原则：能源终端使用效率和能源服务（撤销理事会 93/76/EEC 指导原则）。
- 9) 98/11/EC 指导原则：家用灯能源标识。
- 10) Eup 2000/55/EC 指导原则：荧光灯的镇流器的能源效率要求。
- 11) 2002/91/EC 指导原则：建筑能源性能。
- 12) 2004/108/EEC 指导原则：电磁兼容（EMC）。

8.3 照明系统技术进展

照明系统由灯、发光体和控制装置（控制开关、点亮和调节系统）组成。为每个特定任务设计一个适当的照明系统，除了光的亮度和质量外需要考虑一系列的性能特点，照明技术的选择也受经济性、耐久性与美观的影响。在过去的几十年里，照明设备工厂已经在能源效率方面做了很大的改进，包括新灯具技术、灯具的光学性能改进和用于放电灯的高频率低能耗电子控制装置。

8.3.1 高效光源

灯是照明设计过程中考虑的首要部件，灯具的选择需要考虑灯光的亮度、彩色再现指数、色温以及整个照明系统的其他技术和经济特性。根据参考文献 [6]，照明系统的平均光照效率已由 1960 年的 18lm/W 提高到 2005 年的大约 48lm/W ，但是改善率似乎从 1960 ~ 1985 年基本没有变化，每年在 2.8% 左右，而自 1985 起每年下降 1.3%。

大多数人工光源由三个过程产生：①白热（由热固体发光）；②直接气体放电；③发光（紫外线转换成可见光）。过去几十年来兴起了一种基于半导体发光的新技术（SSL 或 LED）。

目前正在使用的电灯类型如图 8.1 所示，其主要特征见表 8.1。事实上，根据灯具所产生光的质量，各种灯具技术有不同的用途，包括亮度和所产生的光的颜色特征、点亮速度和到达最大输出的时间以及控制的难易程度。

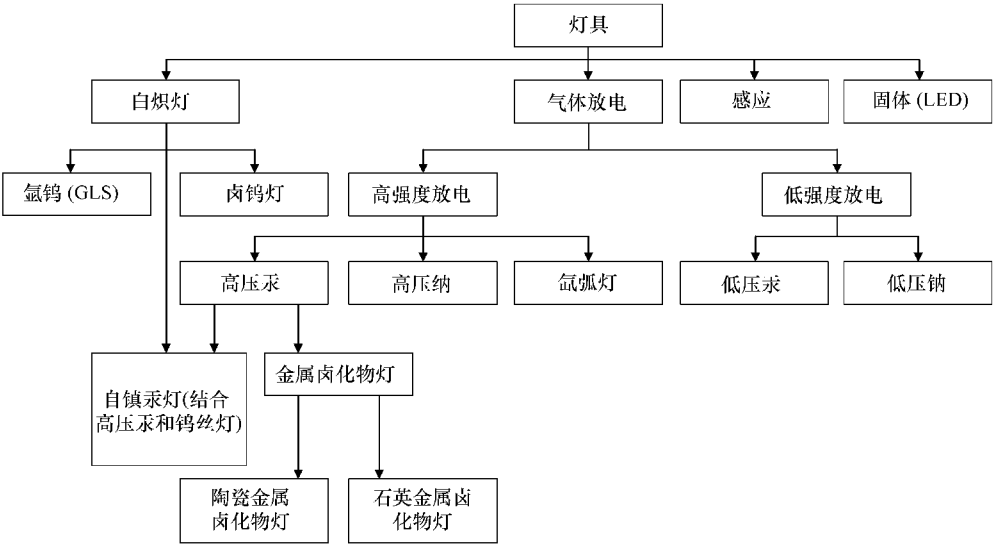


图 8.1 光源分类

表 8.1 现有光源主要特性

	白炽灯		低强度放电			高强度放电		固态
特性	光仪	石英卤素	荧光灯	紧凑型荧光灯	汞蒸气灯	金属卤化物灯	钠汽灯	LED
效率 ^① /(lm/W)	低 (8 ~ 17)	低 (20 ~ 30)	中高 (60 ~ 100)	中高 (50 ~ 65)	低到高 (15 ~ 70)	高 (60 ~ 100)	高 (75 ~ 160)	高 (200)
寿命/h	最短 (少于 2000)	短到中等 (750 ~ 12000)	中等到长 (7500 ~ 24000)	中等到长 (10000 ~ 20000)	中等到长 (6000 ~ 24000)	中等 (1500 ~ 15000)	长 (14000 ~ 24000)	
显色	出色(100)	出色(100)	中等到优 (50 ~ 98)	中等到优 (50 ~ 80)	差 (15 ~ 50)	中等到优 (60 ~ 90)	差 (17 ~ 25)	优 (> 80)
普通功率 范围 ^② /(W)	高达 1500	高达 1500	8 ~ 220	4 ~ 40	40 ~ 1000	70 ~ 2000	70 ~ 1000	
安装成本	低	低	低	低	中等	中等到高	中等到高	
运行成本	最高	最高	中等到低	中等到低	高到中等	中等到低	低	
更换成本	低	中等	低	中等	低	高	高	
重启时间	瞬时	瞬时	瞬时	瞬时 ~ 3s	3 ~ 10min	10 ~ 20min	少于 1min	瞬时

① 包括控制装置和镇流器能源消耗。

② 仅灯具。

白炽灯是最古老的电气照明技术，其能效也是最低的（只有 5% 的电能转换成光，95% 的电能作为热量消耗）且寿命最短。另外，白炽灯能产生相对高质量的光（特别是出色的显色），因为熟悉和低廉的价格，所以是许多消费者的首选（不过，如果按照使用寿命成本分析，使用白炽灯通常比其他高功效的光源更贵），同时白炽灯泡噪声小、可调光且瞬间启动。因为其低效率，许多国家政府已规定以更有效的灯具替代低效的白炽灯。

线性荧光灯是最常见的气体放电发光灯具，自 1937 年商业化以来，由于其运行成本低，在商业和工业中被广泛应用，在全球照明灯具中数量最多。

荧光灯比白炽灯具有更高的效率和更长的使用寿命。具有高彩色再现指数（CRI），这些灯还可提供 2700（白炽灯）~7500K（白天）大范围的颜色温度。荧光灯技术已在过去 20 年中取得重大进展，由低效的电感镇流器运行的老 T12 灯已被新的产品替换（T8 灯及 T5 灯）。

T8 灯在 20 世纪 80 年代得到初迅速发展并成为近几年荧光灯更新的最佳选择方案（包括高效磁或高频电子镇流器）。最近对于 T8 灯的改进在于显色性的改善（三磷涂层）、更长的寿命（比标准 T8 灯寿命延长 20%）以及额定光通维持率为 0.94。

电子镇流器与 T8 组合灯具能够提供电磁镇流器与 T12 组合灯具相同的照明效果，但是减少电能消耗多达 40%，同时 T8 灯管寿命比 T12 灯长 50%。大多数 T8 灯可由传统电磁式镇流器驱动，可直接取代 T12 灯。然而，值得注意的是，并不是所有的电磁镇流器和 T8 可以兼容工作，在大规模更换灯具前应该先进行相关试验^[16]。

高性能 T8 灯是专用的灯管/镇流器系统的一部分，在相同的光输出下，可以比标准 T8 系统节省约 19% 的能量且寿命是标准 T8 灯的两倍（配合程序启动镇流器）。另外，它们的光通维持率高（95%）且 CRI 高（86）。

T5 灯有两种截然不同的类型：标准（高效）型和高输出（HO）型，所有产品都由电子镇流器驱动。它们的设计目的是在 35℃ 时输出达到峰值，而 T12 和 T8 灯在 25℃ 时输出达到峰值，这一特性使得在很少或根本没有空气流通时能够提供更高的光输出。标准的 T5 灯比 T8 灯的效率 12% ~ 18%，比高输出 T5 灯的效率 10% ~ 15%。T5 灯采用稀土荧光粉，CRI 大于 80，灯的额定光通维持率为 95%。

高输出 T5 线性灯与标准 T5 灯的大小相同，但提供较高的光照强度。高输出型 T5 灯比标准 T5 灯产生的光照强度高 1.5 ~ 2 倍，且是 T8 和 T12 灯光照强度的近 2 倍（188%）。遗憾的是，比标准 T8 灯的能源效率低多达 8%。

通常，T5 灯不能取代 T8 灯，因为 T5 灯需要与其配套的高频镇流器，不同于常规的 T8 灯。同时，T5 灯管长度比 T8 灯略短，且灯具底座上的间隔必须不同。总之，改造现有的 T8 灯和 T12 灯照明成为新 T5 灯需要进行镇流器更换，甚至可能

更换整个灯具,使得改造成本高。为了避免改装灯具,从 T8 灯和 T12 灯的电磁镇流器更换到 T5 灯的电子镇流器时,引进了“插头和加强”(Plug & Enhance, PnE)技术,在换管时引入准电子镇流器(QEB)^[16]。QEB 是一种电子装置,连接在端盖上在一个装置内,并与原电磁镇流器一起点亮灯管。QEB 使 T5 灯可以直接安装在 T8 灯和 T12 灯的位置上,更换后整体效率相当于一个简单的电子镇流器 T5 灯装置。原来系统的起动器需要更换成短路部件。

紧凑型荧光灯(CFL)通常包括 2、4 或 6 个小荧光灯管,安装连接到一个镇流器上(镇流器综合模型);CFL 也可以是插入式管(对于非集成产品)。集成系统使用 and 标准白炽灯同样的方式,即螺钉或卡口,新模型对于各种螺杆直径都适用,是有效提高住宅照明节能最有效的解决方案。事实上,CFL 能耗仅为白炽灯所需能耗的 20%~25%,并提供与其相同的照度水平(约 25% 的电能转换为可见光,传统的白炽灯只转换 5%)。然而,其感知率(perceived ratio)接近 30%;原因可能是因为两个灯的光谱分布非常不同,白炽灯的灯光光谱具有光滑的分布,类似于一个黑色整体,而 CFL 的灯光光谱是有很多的波峰和波谷的分布^[5]。

20 世纪 80 年代,CFL 首次得到商业化,每年 CFL 的技术都有所改进。目前产品已减少对环境的影响(使用汞作为银汞合金),包括提供更高的效率、瞬间启动、减少灯闪烁、运行安静、体积小、重量轻。它们也有更广泛的色温范围,从与白炽灯相同的温度到接近日光的更高值。预期寿命是从 6000h(主要针对住宅市场)到大于 15000h,且不再受开关影响(认可的现行标准要求 3000 次开关每 8000h 的测试生命周期;此外,一些制造商生产的重载 CFL 节能灯高达 500000 次开关性能和寿命为 15000h)。CRI 的典型值(80~85)对于大多数应用是足够高的,且近十年的价格也在大幅下跌。

可调光 CFL 已经投入使用(1996 年引进了螺旋调光 CFL),下一代 CFL(也被称为超级 CFL)将改进其性能:完全可调(调光平滑下降到 10% 的光输出,而没有颜色变化)、具有在任何光照水平重新启动的能力、高功率因数、更高效率(至少 70lm/W)等。

缺点是:即使目前可以使用低谐波装置,电子镇流器 CFL 的电流总谐波畸变率(THD)也可能超过 30%。磁镇流器 CFL 的电流 THD 通常为 15%~25%,这在许多实际应用中是可以接受的。电子镇流器 CFL 技术的改进和成本减少,使它们在经济上是可行的,它们能够提供即时启动、同时驱动 3 只灯的能力、减少闪烁、减小尺寸和重量,并增加 20% 的效率。即使电子镇流器系统的成本比白炽灯高几倍,但考虑其整个生命周期成本还是合算的。

高强度放电(HID)灯是一个充满气体的灯管中通过比荧光灯更高电压产生辉光从而产生放电电弧。最初应用于户外和工业,后来还用于办公室、零售和其他室内应用。这些灯能源效率高、寿命长(5000~24000h);不幸的是,它们需要时间预热,且短时间间隔内无法打开和关闭。目前有 3 种流行 HID 灯类型(按效率从

低到高顺序排列)：汞蒸气灯、金属卤化物灯和高压钠灯。

高压汞蒸气灯基于旧的 HID 技术，会被淘汰，因为它们相对能源效率低 (30 ~ 60lm/W)、CRI 低和在所有 HID 灯产品中具有最高的流明衰减率。

金属卤化物灯通过高压混合气体 (氙、汞和各种金属卤化物) 电弧产生光，并且是现在最节能的白光光源 (高达 100lm/W)。因为金属卤化物灯比汞蒸气灯效率高了近两倍，常用于工业设施、体育场馆和其他 CRI 要求高的场所 (颜色再显效果非常好，高达 96)。由电子镇流器驱动的高功率脉冲启动系列 (175 ~ 1000W)，正在迅速取代标准的金属卤化物灯，通过较快重启提供较高效率 (高达 110lm/W)、增强光通维持率 (高达 80%) 和灯的颜色一致性 (100K 内)。

在过去的几年中，由电子镇流器驱动的陶瓷金属卤化物灯 (CMH 或 CDM) 也在商业上有所应用，在这种情况下，一般应用多晶氧化铝 (PCA) 电弧管。这个系统有以下优点：流明输出提高 10% ~ 20% (即高效)、最好的颜色稳定性，CRI 高 (83 ~ 95)、有限的色移 ($\pm 75 \sim \pm 200\text{K}$)、优良的颜色一致性和良好的光通维持率 (0.70 ~ 0.80)。

高压钠 (HPS) 灯产生金色 (黄白色) 光，是较为经济的选择，应用于户外和工业中对 CRI 需要不高的场所 (它的发光效率为 100 ~ 150lm/W，但 CRI 低，在 25 左右)。现在，由于白色光源如金属卤化物或荧光的出现，HPS 灯正被淘汰，面对这种情况，新一代高压钠灯进行了一些改进，已实现循环利用，实现汞含量减少甚至为零。

在 20 世纪 90 年代早期出现了以电磁感应为基础的感应灯，它们使用电磁场 (由一个高频电子发生器产生) 在有荧光涂层的灯管或灯泡中诱导等离子体气体放电。因此，这些灯没有电极，运行时间将比荧光灯和金属卤化物系统长 4 倍，比 HPS 系统长 5 ~ 8 倍，它们有良好的发光效率 (80lm/W) 和 CRI (80 ~ 90)。此外，感应灯寿命长 (60000 ~ 100000h) 是这些系统的主要优势，在维护劳动成本高的场所，感应灯是不错的选择。

固态照明 (SSL) 技术涉及发光二极管 (LED) 和有机发光二极管 (OLED)，是一种当电流通过时可以发光的半导体器件。固态照明取得实质性进展，在照明市场 (例如照明、信号、便携式照明、太阳能 LED 照明) 中取得了长足的发展。目前它们已经可用于室内和室外的一般照明。制造商正为普通照明开发新型 LED 灯，预期将快速降低成本。

由于 LED 具有显著的优势 (寿命长、CRI 高、光谱分布均匀、设计灵活、体积小、易于控制和调光、无汞含量等)，在不久的将来，预计 LED 将从根本上改变目前的照明方式 and 市场格局。LED 的节能性能仍在持续改进，根据参考文献 [2]，到 2015 年荧光粉转换的冷白光 LED 的最大发光效率有望达到 200lm/W (从现在的 120lm/W)，而暖白光 LED 发光效率将超过 140lm/W (目前从 80 ~ 100lm/W)。

OLED 是另一种有前景的照明技术，最终可能生产出明显比 LED 更便宜的照明

装置。虽然 OLED 的某些性能还不及改进后的 LED, 但根据参考文献 [3, 17], 它们在 $1000\text{cd}/\text{m}^2$ 条件下发光率已经达到 $32 \sim 64\text{lm}/\text{W}$ 。

伴随 LED 效率提高, 简化了 LED 的热管理这个主要问题, 并且可以降低系统成本。事实上, 照明系统的整体性能在很大程度上取决于灯具, LED 灯具芯片应该有高效的散热效率。换句话说, 灯具的设计, 特别是散热片的设计对 LED 的寿命起着重要的作用。

8.3.2 高效镇流器

所有的放电灯具具有负阻抗特性, 且辅助装置 (称为镇流器) 应当使用得当, 镇流器提供了高电压启动放电电弧, 然后在正常工作期间限制电流维持放电电弧稳定 (也可能包括电容器以校正功率因数)。镇流器有两大类: 电磁镇流器 (也被称为铁磁或铁芯和线圈镇流器) 和电子镇流器 (也被称为高频或固态镇流器)。电磁镇流器是最受欢迎的镇流器, 由几个叠层钢板磁心外面绕铜线而成。虽然它们能实现层级或连续调光 (对于最新产品, 不低于 20%), 但是电磁镇流器体积大、重量重、效率低、对电压的变化的敏感性高^[18]。电子镇流器可以克服所以这些缺点, 同时也为照明控制提供更多的可能性, 它们利用电子反应器允许灯运行在较高的频率 (20kHz, 灯能源效率提高 10% ~ 15%)。由电子镇流器驱动灯具的还具有如下优点^[6]: 增加的平均流明输出 (可高达 20%, 这取决于灯类型)、延长灯的寿命 (高达 30%)、尺寸小和重量轻、减少灯闪烁、噪声低、光通维持率高、具有更好的启动和操作控制特性、无需校正功率因数电容器、电路控制更准确、实现全调光能力或无缝集成到建筑能源管理系统 (BEMS) 等。

最新的灯具提供额外的功能: 根据日光强度, 利用光电池自动调节荧光灯的光输出 (节省大量的能源); 一些镇流器有自动检测输入电压并自动与之匹配的电路, 可以使一个单一的镇流器工作在多种电压模式; 一些灯具使用智能电路优化灯的启动和重启, 延长荧光灯的使用寿命 (对于需要频繁开关的灯, 例如人体感应传感器, 这是非常重要的功能)。

总之, 电子镇流器能源效率高, 对空调系统来说, 它产生的热负荷更少, 并具有消除闪烁和嗡嗡声的功能。可用于 CFL 和全尺寸灯具的电子镇流器, 能同时连接 4 个灯的灯具 (与 2 灯镇流器相比, 3 灯和 4 灯镇流器节省材料和能源的成本, 因为需要的设备少)。某些类型的镇流器也可以提高系统整体效率, 4 灯电子镇流器的耦合损耗通常小于 4 个 1 灯电子镇流器耦合损耗之和。然而, 处于电气安全性考虑, 镇流器和灯之间的电缆应该被遮蔽起来, 且需要将电磁干扰抑制到一个可接受的范围, 通常在同一个灯具中用一个镇流器驱动多个灯^[16]。

作为照明系统的一个组成部分, 镇流器同样有电能损耗; 镇流器能耗占整个照明系统能耗比例, 取决于镇流器的效率, 一般从百分之几到高达 40%, 高效的新一代磁镇流器的能耗已经减少到 12% 左右, 而典型的电子镇流器能耗为 30%。为了逐步淘汰低效镇流器, 欧盟采用了 2000/55/EC 指导原则对荧光灯照明的镇流器

能源效率提出要求，并于2002年5月21日生效（本指导原则的目的是通过限制镇流器损耗提高照明系统的效率），要求厂家标明镇流器的效率，并禁止在欧盟销售低效镇流器。类似的规范也已在美国推出^[19]。

因此，欧盟灯具电工元件联合全国制造商协会（CELMA）开发了一个考虑了灯和镇流器的分类系统，镇流器根据能源效率指标分类如下^[15]：

- 1) D类：损耗非常高的电磁镇流器。
- 2) C类：损耗中等的电磁镇流器。
- 3) B2类：损耗低的电磁镇流器。
- 4) B1类：损耗非常低的电磁镇流器。
- 5) A3类：电子镇流器。
- 6) A2类：低损耗的电子镇流器。
- 7) A1类：可调光电子镇流器。

如果满足以下要求的可调光镇流器属于A1类：

- 1) 当光输出到达100%时，镇流器至少满足A3类要求。
- 2) 当光输出到达25%时，输入功率等于或小于100%光输出时功率的50%。
- 3) 镇流器必须实现将光输出降低至最大光输出的10%或更少。

自从2002年5月，D类镇流器已经被禁止出售，而C类镇流器在2005年9月21日也被禁止。如果欧盟A类镇流器的销量增加不够多，则还将设置淘汰B类低效率镇流器的日期。

8.3.3 高效灯具

一个灯具（是大多数场所的必备设备）由灯、镇流器、反射罩、透镜或百叶窗和外罩组成，其主要功能是集中或分散从灯发出光而不产生闪烁。一个灯具的效率是指在预期方向上实际输出的光与灯所产生的光的百分比，不同的灯具和不同的灯配置间灯具效率差异很大。

设计或维护不当，可能引起灯和镇流器过热而缩短产品寿命，当根据现有的标准计算安装数量时，必须考虑灯具维护系数（LMF）的衰减，所以需要使用大于标注低维护系数的灯具。另一方面，为了得到高利用率（UF），直接将光照方向对着需要照明区域或是很重要的位置（UF越高，需要用来运行灯的能量越低）。一些增加LMF的解决方案如下：

- 1) 更高层次的入口保护（IP率）；
- 2) 使用新材料（如由UV射线激活的有自净功能的玻璃）；
- 3) 使用内部顶部反射镜或反射性顶屏蔽罩；
- 4) 适当使用能降低扩散和高光学透过率的透明保护材料；
- 5) 针对高度不对称光分布面的多面反射技术；
- 6) 将喷涂反射器改为镀铝反射器。

8.4 室内照明系统的能源效率

虽然近几年现代化高效的照明技术得到了越来越广泛的应用,特别是在广告业。然而,还有很大一部分的照明能源被低效、过时的照明技术所消耗,例如白炽灯和使用低效镇流器的荧光灯等。2007年,欧盟的27个国家中,白炽灯仍然占主导地位,即共出售767百万个白炽灯,并且其中54% (26亿个灯或平均13.1个灯/家庭)的白炽灯还在使用,1/3 (33%) 非定向出售的GLS白炽灯为60W,31.6%的为40W^[21]。

8.4.1 支持能源效率的政策

人们开始认识到白炽灯能源效率十分低后,高质量、低价格的新灯具越来越多并被广泛应用,许多国家在2007年年初立法规定在其辖区内淘汰白炽灯和其他低效灯具^[17]。同时规定了采用或者准备采用新灯具的目的是鼓励使用高效灯具(最值得注意的是GFL)来代替标准GLS灯具,堵住能源浪费的主要源头。不同国家淘汰过时灯具的时间不同,对于大多数情况和所有的大市场,一种分阶段方法是部分GLS市场更早实施禁止销售。淘汰低效照明技术的规定开始生效日期各国不同,澳大利亚在2008年年底就开始了,而美国、加拿大和韩国在2012年初才开始生效。目前所知的首次尝试淘汰过时灯具的截止日期为2009~2014年。欧盟国家的淘汰阶段从2009年9月开始,2012年结束。除了监管外,许多温和的方案也正在实行或正在制定,包括大规模的市场转型工程、能源效率计划、激励零售商的财政/金融措施。许多计划在足够大范围内对当地的GLS和GFL市场产生了巨大影响。

另外,欧盟也对放电灯、镇流器和灯具规定了最低要求,对其余产品有最低效率和质量要求,淘汰如下产品^[21]:

- 1) 除了特殊场合,线性T12和T10晕磷酸盐灯将从2012年开始被禁止使用。
- 2) 将制定对T8和T5线性灯具的最低要求。从2010年开始,T8晕磷酸盐灯将被禁止使用。
- 3) 从2012年开始,新灯具将和电子镇流器一起出售。从2017年开始,电磁镇流器将被禁止使用,也不能用新的电磁镇流器更换原有的电磁镇流器。
- 4) 将引进光通维持水平的最低要求。
- 5) 从2017年开始(规定开始实施的8年后),所有的荧光灯必须设计成与电子镇流器配套使用。

被用来确定是否一个灯具在欧盟市场允许的标准是它的能源标签分类(A~G,A是最节能的类型,G为最不节能的类型)。A类灯具将贴上A类标签,如果A类灯具的功率(W)满足要求^[3]:

$$W \leq 0.15 \sqrt{L} + 0.0097L \quad (8.1)$$

对于没有整体镇流器的CFL,或者对其他种类的灯具:

$$W \leq 0.24 \sqrt{L} + 0.0103L \tag{8.2}$$

在式 (8.1) 和式 (8.2) 中， L 是灯输出照度。如果灯具无法满足能源标签分类，则计算一个能源效率指标。能源效率指标 (E_1) 是灯具实际功率 (W) 和参考功率 (W_R) 的比， W_R 由式 (8.3) 给出：

$$W_R \leq 0.88 \sqrt{L} + 0.049L \tag{8.3}$$

表 8.2 给出了不同范围的能源效率指标的能源标签分类。

表 8.2 不同范围的能源效率指标的能源标签分类

能源标签等级	能源效率指标 (E_1)
B	小于 0.60
C	等于或大于 0.60 且小于 0.80
D	等于或大于 0.80 且小于 0.95
E	等于或大于 0.95 且小于 1.10
F	等于或大于 1.10 且小于 1.30
G	等于或大于 1.30

可替代白炽灯的灯具如下：

- 1) 传统低压卤素灯：在 2016 年前可使用（可达到 C 类并且可以使用寿命达 4000h）；
- 2) 填充氙气的卤钨灯（C 类）：对于相同的光输出比最好的传统白炽灯节能 25%；
- 3) 红外涂层卤素灯（B 类）：对于相同的光输出比最好的传统白炽灯节能 45%，寿命能达到 3000h；
- 4) 紧凑型荧光灯（CFL）：对于相同的光输出比最好的传统白炽灯节能 65% ~ 80%；
- 5) 发光二极管（LED）：一个新兴技术，光效与 CFL 在同一范围内（而且不含汞且使用寿命长）。

这些灯具的具体技术参数见表 8.3。由于以上所述规定，欧盟国家预计将节能大约 40TWh，同时每年减少 1500 万 t CO₂ 排放，为此欧盟经济体将投入大约 50 ~ 100 亿欧元^[21]。

表 8.3 节能灯具技术与传统白炽灯比较（E 类）

灯具	能源节约	能源等级
白炽灯	—	E, F, G
传统卤素灯（主要电压 230V）	0 ~ 5%	D, E, F
传统卤素灯（低压 12V）	25%	C
氙气填充物卤素灯（主要电压 230V）	25%	C
红外线涂料卤素灯	45% ~ 50%	B（低端）
灯泡形外罩低光输出 CFL, LED	65%	B（高端）
无外罩高光输出 CFL, LED	80%	A

除了这些优势,采用节能照明还必须克服一些障碍:

1) 经济障碍:新型节能照明设施的初期成本很高,因此,尽管面对日渐提高的能源成本,投资回报率低使许多业主也许无法或者不愿意投资购买这些新型节能照明设施。另一方面,对于企业和工厂,采用节能措施对用户唯一的吸引力是降低日渐提高的能源成本。不幸的是,有时候投资在改造工程项目的回报期很长(两年或者更久),特别是对于小中型企业。这些企业不能确定是否能够运行企业如此长的时间来最终从投资中获利,成为使用新型节能照明设施的阻碍。另外,经济萧条也是投资节能设施的一个抑制因素。

2) 制度障碍:通常任何新制度的成立需要许多时间并通过法律进而生效,最终得以实施。这是使用节能照明的一个重要的障碍。对于古旧的建筑,改造成本高是使用节能照明设施的经济障碍。

3) 消费者障碍:对于消费者,缺少对节能照明的知识和节能意识是使用节能设施的巨大障碍(特别是对于居民)。在商业和工业上,尽管对消费者在收益率上有较大的吸引力,多数零售商和商人仍然用效率低的产品。另外一个消费者障碍是美观问题,因为使用者也许不喜欢或者不习惯新型照明产品的颜色特性。照明设备性能上的不足也是一个障碍,例如人们有时候抱怨他们的 CFL 有闪烁现象和噪声。

4) 制造障碍:在制造生产过程中会出现不同的失误,最终影响了照明产品的使用(使用寿命、CRI、流明输出等),这也是一个使用高效照明产品的障碍。再者,新兴技术,例如 LED 灯,仍然在发展阶段,整体性能还不高。

5) 相反的,许多的企业办公地是租赁的,使得租赁者对于不属于自己的建筑没有投资兴趣。而出租者也没有投资兴趣,因为他们通常认为使用者应该承担相关费用。

8.4.2 改造还是重新设计

当一个现有的照明系统有改造机会时,首先是考量现有照明系统在功能上的有效性及其功能特点。紧接着照明系统的管理者面临的问题是改造现有的照明系统还是重新设计。对于改造,当现有控制可以被替代时,新的灯和镇流器安装在已有的灯具上;对于重新设计,现有的灯具将被替代或改变。

8.4.2.1 重新设计

如果建筑的主要空间被设计用于新的功能,而现有的照明系统不能够满足照明需求,重新设计照明系统对于这种场所是有优势的。一般的,为了得到高效、节能的方案,应该采用下列设计原则:

- 1) 高效率的发光光源;
- 2) 低能量损失的灯具控制设备;
- 3) 光输出率高的灯具;
- 4) 高反射率的房间表面;

5) 最佳安装高度。

然而，能源效率标准与其他照明效果标准是相互矛盾的，所以必须权衡这两者。例如，从能源效率出发，应尽量选择高发光效率的光源，然而这样的能源准则必须与其他照明设计准则相容，例如显色性。再者，在许多应用中，光学特点经常是选择灯具类型的首要准则，而灯具效率则成了第二重要。

仔细挑选灯具的结果是使得有合理的照度、最小的直接眩光、反射眩光和光幕反射，最终所选产品的可视度和生产率都可以提高。灯具选择过程中，重要的因素包括灯具的使用系数（UF）、灯具灰尘折旧（LDD）、房间表面灰尘折旧（RDD）、灯具流明折旧（LLD）以及灯具故障系数（LFF）。

8.4.2.2 改造

有很多机会可以将一个现存的照明系统改造成节能高效照明系统。合理照明系统的商业利益应该予以考虑。从经济上看，将现有低效照明系统改造成新型高效设备不仅可以减少运营成本，而且可以提高照明质量、提高工作效率、改善视觉感知环境^[16]。

另一方面，首先要选择的是整体更换现有照明系统，还是当照明设备有故障时单独更换某一个照明设备。显然，独立替换设备是一个最简单的方法，因为这个办法避免了预支设备的成本以及安装劳动力和潜在的更新风险。基于这些考虑，大多数公司选择当一个灯具烧坏时更换一个灯具^[11]。然而，整体更换有以下主要优势^[11,19]：

1) 整体更换能够提供良好的照明性能、同一性和照明场所的外观，同时避免了同时维护不同输出照度的灯具而造成的混淆；

2) 重新评估现有照明系统并且升级成当前最好的设备能够更加节能并且有更好的光照质量；

3) 大批购买节约投资成本；

4) 减少时间和劳动力成本。

经验证明，集体点亮灯的时间只占灯生命周期的 50% ~ 70%。灯的操作时间间隔取决于特定因素（例如电压质量、环境条件、开关个数、使用者习惯等）。因此，同样的光源灯具可以有不同的工作特点，并且在不同地点工作，就有不同的更换时间。对于能源管理者，保存灯和镇流器的更换记录，确定最合适的更换周期是十分重要的，这也有助于保持跟踪计算维护成本、劳动力的需求和预算。

可以根据投资回报期来评估各种改造方案。灯、镇流器和照明系统的组合有许多种，一些常见的改造组合如下：

1. 更换灯

最常用的方案如下：

1) 白炽灯变为 CFL：这是提高居民照明能源效率的最高效的方案。可以参考参考文献 [3]，以了解更多的细节来找到标准和软输出的白炽灯的合适的替代品。

2) 白炽灯更换为卤素白炽灯 (C 和 B 能源类型)。

3) 白炽灯更换为 LED 灯 (LED 灯的效率提高得很快, 自从 20 世纪 60 年代大约每两年提高一倍)。

4) 标准卤素灯更换为白光 LED 灯。

5) 荧光灯更换为荧光灯 (T12 灯变为 T8 灯或 T8 灯变为高输出 T5 灯, 与电子镇流器结合的 T5/T8 灯是最受欢迎的选择)。

6) 荧光灯更换为 LED。

2. 更换镇流器类型

方案如下:

1) 电磁镇流器改为低或极低损耗电磁镇流器;

2) 电磁镇流器改为电子镇流器。

3. 更换灯具

当决定改造照明系统时, 更换反射器是一个非常简单的和低成本的选择, 因此灯具效率的增加是因为更少的光线被阻挡或者被浪费在灯具配件中。几何外形、涂层材料和灯具的效率决定了反射器的好坏。反射器更换通常可以减少 3 或 4 个灯具而同样可以达到相同的光输出水平 (通常, 剩余的灯可能需要重组, 以最大限度地提高光输出和均匀性)。与更高输出的荧光灯和电子镇流器组合, 加上合理的反射器, 照明系统照度将大大提高。不能通过单独清洗改善旧灯具的性能, 更换成效率高的反射器是照明改造不错的选择。

相反的, 屏蔽设备通常安装在灯具中来控制不舒服眩光, 而低效的屏蔽装置则会降低效果, 即便是最高效的灯和镇流器也是如此。因此, 平衡视觉舒适 (眩光控制) 和灯具效率是实施反射器的成功改造的关键。

有时, 更换灯具而不是改造灯具是更经济和成本可行的, 特别是在当照明系统的要求有重大的变化时: 新灯具可以优化效率、视觉效果、技术的兼容性和外观等^[16]。

4. 升级照明控制

考虑到这一问题的复杂性, 照明控制将在后面进行详细阐述。

8.4.3 照明控制

现在有些照明系统运行不当, 造成很大一部分灯具产生的光照射到没有人或者阳光充足的地方。可通过适当地控制操作时间和/或照明系统输出照度以减少能量消耗。照明控制系统能够根据具体环境条件调整照明的工作状态。

照明控制可以通过手动或者自动, 或者手动和自动结合的方式。照明控制必须方便用户使用。控制技术升级的方式有很多种。从简单的 (例如, 将手动开关安装在合适的位置) 到更复杂的 (安装占用传感器等), 照明控制的选择对总体照明能源使用有很大影响。根据参考文献 [6], 采用先进的自动控制, 可以节省很大部分能源 (通常为 20% ~ 35%), 还具有很高的成本有效性。通过适当控制以减少

照明照度或直接关闭灯光，减少照明系统能耗，其具体能源使用情况取决于以下情况下^[16]：

- 1) 日光的利用程度；
- 2) 视觉感知任务的变化；
- 3) 使用时间安排；
- 4) 照明设备保洁。

随着技术改进和照明控制系统价格持续下降，同时由于经济和环境方面的因素，先进照明控制系统的使用不断增加，特别是照明消耗能源在整个能源消耗比例较高的商业和公共场所。同时，自动控制的设计应避免干扰用户，例如照度的突然变化可能影响关键任务区域的工作并可能导致劳动或安全问题。最终，由于用户不满或破坏活动（用户使用不方便），自动控制则不能达到预期的节能^[5]。

如今，只有少数适合的场合使用了自动照明控制，因此照明控制节能潜力很大。目前，人们实施了各种控制措施，措施的适合度取决于特定使用环境和能源使用模式。所有控制措施可以总结为以下两种主要类型：

- 1) 开关控制；
- 2) 层级控制。

对于第一种类型，只提供了打开和关闭现有照明系统的能力；通过使用层级控制，灯发出光通量可能连续或层级调整（通常为两或三层级）。所有的控制类型可以手动或自动实现。

8.4.3.1 手动控制

手动控制是最简单的控制方式，主要具有开/关两种功能。标准的照明手动控制节能设备是单极开关。手动控制的效率通常取决于开关位置，因为如果开关与房间出口过远，或者难以找到，用户就不愿意关灯而直接离开房间（用户不想在黑暗中寻找出口）^[11]。对于改造现有照明系统来说，将现有供电电路拆分，在需要局部照明的地方安装辅助开关。

白炽灯层级控制的固态调光器也可以使用，但是它们将来的重要性将减少（白炽灯将被禁止）。幸运的是，一些镇流器生产商将这些调节器与节能 CFL 组合使用，从而促进白炽灯系统升级。

8.4.3.2 自动控制

自动照明系统也被称为响应照明。尽管自动控制是一种成熟的技术，它们只是逐渐在建筑中被应用，因此仍然为具有成本有效的节约能源提供一个巨大的潜力。

1. 自动开/关控制

减少照明能量消耗可通过关掉运行数小时而又不需的灯来实现，所有不连续使用的空间都应安装自动开关，当空间不被使用时应该自动将灯关闭。自动开关控制可以使用占用检测或定时器。

如今，占用（或者运动）传感器是一种高效节能设施（见表 8.4），有三种类

型的占用传感器都是基于运动检测的：被动红外传感器 PIR（检测运动热源）、超声波传感器 US（检测物体在空间的移动）和混合技术传感器 [也称为双技术（DT）传感器，它们同时配有超声波和被动红外探测器，该技术避免了错误开启，例如，风吹动窗帘或纸张而造成启动系统。另一个双技术传感器包括一个传声器传感器，检测小的声音，如翻纸张，即使用户在房间没有明显的运动]。

表 8.4 使用占用传感器所节约能源估算^[11]

应用	节约能源（%）
办公室（私人）	25 ~ 50
办公室（公共）	20 ~ 25
休息室	30 ~ 75
走廊	30 ~ 40
储藏室	45 ~ 65
会见室	45 ~ 65
会议室	45 ~ 65
仓库	50 ~ 75

当传感器检测到的运动时，则激活控制装置，打开照明系统。如果没有在指定时间内检测到运动，则关灯，直到再次检测到运动为止。对于大多数传感器，灵敏度（检测运动的能力）和延迟时间（当传感器没有检测到运动和灯熄灭之间的时间内）是可调的。占用传感器可以结合调光控制或阶梯开关，如此，当使用者离开房间时，灯的照度会调低到较低的水平^[6,11]。

占用传感器可安装在墙上或天花板上，传感器安装在墙上适用于对信号检测没有障碍的小空间；传感器安装在天花板上建议用于更大的空间、形状不规则的房间和有隔间的房间。值得强调的是，如果传感器安装不当或是被使用者破坏，是不能实现节能的。例如对于被动红外传感器，用户必须在其直接的视线范围内才能够被检测到；对超声波传感器，用户不需要在其直接的视线内，但风吹窗帘或文件可以使传感器发出错误信号。

电子或机械技术中的定时器/时钟可以设定时间开关，因此可以用于照明控制系统，根据固定的时间表控制照明灯具的开关。但是应该定期检查确保定时器/时钟是否工作正常，还需要根据季节不同设置不同的时间表（通常计时器应每年至少两次进行重新设置以适应太阳在夏季/冬季的降落/上升时间）。

手动开启/自动关闭照明控制系统通常配置占用传感器和定时器开关，在一天的开始，或在需要的时候，用户手动打开照明灯^[16]。定时器通常与低能耗的应急照明系统（确保用户可以安全地找到自己的路）配合使用。

2. 自动层级控制

在自动层级控制系统中，电力照明根据检测的照度值自动调节照明系统的输出亮度，使照明场所的亮度保持在设定值。自动层级控制由光电传感器和有调光功能

的电子镇流器组成：传感器连续测量照度水平，而镇流器自动调整人工光源的输出亮度。自动调光系统具有以下优点：

- 1) 它可以弥补由于灯的输出亮度衰减和灯具污垢衰减而浪费的功率；
- 2) 根据活动水平调整照明水平；
- 3) 根据日光变化而改变照明系统输出亮度（见 8.4.4 节）。

一般来说，用具有调光功能的电子镇流器驱动线性荧光灯，许多电子镇流器可以在任何调光器设置下启动灯，可以在达到最大光输出之前就进行调暗亮度操作。现在大多数调光镇流器具有独立低压控制导管，其可组合在一起成为独立于功率区域的控制区。用于大功率照明系统的调光模块适合与时钟、光电池或电脑连接，可以保证有从 100% 到 1% 的调光范围。一些制造商为高功率快速启动的 CFL 提供调光镇流器，最低调光限度是 5%，不同制造商有不同调光范围。这些调光镇流器接收了来自白炽灯墙式电子调光器的交流相位控制信号，可以升级旧的白炽灯系统为能量高效节能照明系统（无需重新布线）。

照明控制系统的控制信号一般采用 0 ~ 10V 直流信号，即使在市场上有可以接收交流控制信号的调光镇流器^[11]。不同的控制标准提供了接口平台，特别是对于同一制造商的设备和装置。为了保证来自不同制造商的可调光电子镇流器的互换性，可使用国际标准 DALI（数字可寻址照明接口）。其克服 1 ~ 10V 模拟控制接口的相关的问题，并为本地系统的智能组件提供了一个简单的（数字）通信方式。利用 DALI，每个照明系统的灯具可以单独寻址和编程（最终，不同组的灯具可以通过编程来完成各种照明任务）^[23]。

电子镇流器对电能质量的影响有时可能是有害的，幸运的是，市面上大部分型号的电子镇流器达到了参考文献 [24] 规定的要求，在整个调光范围，电流总谐波失真（THD）小于 15%。通常情况下，调光照明系统非常昂贵，可能不适用于所有的照明系统。建议在需要照明调光控制的场所安装调光照明系统。

与开关控制相比，层级控制通常更加节能，可以更好地根据人们的需要进行光分配，并延长灯的使用寿命。它们也适用于人造（电）照明比目前所需光照多的场所，并且还有额外的好处：当有户外的自然光时，可以进一步调光。出于其他原因，这种系统还可以用于调暗灯光，如演示文稿。即使光照强度变化达到 50%，使用者几乎觉察不到，除非他们参与某些任务需要敏感的视觉感知^[11]。

微处理机控制也可以应用于照明系统，可用于控制一个场所的独立照明系统，也可以用于控制一整栋建筑的整个照明系统。它通常与控制设备，如定时器、光敏器件等连接，提供所要求的照明集体/系统性能。它为照明控制提供了极大的灵活性，典型的控制功能通常包括以下内容：

- 1) 自动补偿灯具输出光照衰减和灯具污垢衰减；
- 2) 微调照明水平以满足实际要求；
- 3) 调整照明运行以达到最少的照明时间；

4) 自动采光补偿控制。

8.4.4 采光

可持续发展的概念使人们重新注意采光,例如使日光成为一个场所的主要光源。事实上,日光是无闪光源,有最宽的光谱功率分布和最高的舒适性。通过采光,可以同时得到心理上和能源效率上的好处^[25];

1) 在心理上,日光照明改善用户心情和提高其幸福感(提高工人的生产效率和情绪,减少缺勤和失误)。

2) 从能源效率的角度来看,由于减少电力照明负荷,自然阳光可以节省很多能源。根据报道,从日光照明设计中节约照明能耗在15%~80%之间变化^[6]。非居住建筑在白天有巨大优势,所以利用这些区域日光节能的潜力更大(特别是,有大的开放空间的屋顶区域)。

另一方面,日光照明设计不当会使日光照明的优势尽失,直射阳光可能造成人们失能性眩光或者产生使人分散光注意力的光幕反射,日光的能量也会造成照明空间温度升高而使用户感觉不舒适。

在过去的几十年里,人们对在建筑中引入日光照明的兴趣不断增加,特别是欧洲国家。根据云层条件和建筑物的位置,日光的亮度水平是随着高度变化的。当建筑的设计允许足够的阳光进入建筑物和适当地分配时,日光几乎总是会超过必要的最低照度水平。不同的研究都表明,靠近窗口的区域接收到的日光足够为其提供所有照明需要(只有在白天);房间内部,需要人工光源和日光的混合使用,而房间中有的地方则几乎只能使用人工光源。在日光照射区域,可节能60%~70%;人工光源和日光的混合使用区域,可节能30%~40%;人工光源使用区域,可节能5%~20%^[6]。

以前的数据表明,使用日光响应式照明控制系统节能潜力明显,同时在建筑中增加引入日光照明也有节能空间。不幸的是,日光是一个动态的照明光源,天空照度不是恒定的,且日光的变化很大程度上取决于季节、纬度、位置和云量。这些变化必须由照明控制系统补偿,以保持任务区域照度恒定和均匀,避免造成降低用户照明的舒适性。

日光响应式控制至少要两个方面^[11,26]:照明场所引入日光照度的控制和电气照明输出照度控制。第一方面是为室内提供足够数量和质量的日光(同时,适当控制由门窗进入的太阳能,空调制冷期间获得太阳能少一些,空调制热期间获得太阳能多一些,则可降低空间整体冷却和加热要求);第二个方面则是在日光不足的地方提供照明以提高光照的整体分布。

采光控制使用感光传感器并且使用连续调光技术,允许用户调整照明水平,使照明输出范围广,比步进调光控制具有更大的灵活性。当空间中有足够的日光时,将调暗荧光照明以便保持所需的照度水平。由于连续调光与日光的变化模式非常密切,使用者往往更容易接受,并且更加节能,特别是在云层可变量度大的地区。连续

调光同时补偿由于灯具污垢而减少的光输出和由于灯具老化引起的光衰。模拟或数字镇流器都可以用于连续调光。针对经典控制用以满足日光迅速变化和用户个性需求的问题，人们已经提出了新的分析方法和基于人工智能技术的控制器（例如，人工神经网络和模糊控制）^[26-28]。

通常，根据现有的开窗法和工作任务，房间是被分成几个区域的，正确安装传感器位置对于均衡照明质量和节约能源是至关重要的（各种类型的自动传感器应放置日光的照度水平比较均匀的部分）。在照明系统亮度比控制和显色性方面，电力照明系统应该与日光系统相兼容。这样有助于提高日光的质量和提高了用户对节能特点的接受度。

8.5 户外照明系统的能源效率

在 2005 年，全球总户外照明用电为 218TWh，占了总用电量的 8%；目前所使用的光源平均发光效率是 74lm/W，比工业以外的其他领域照明系统的效率高。每年道路照明耗费了大量电能，当交通密度低时，照明过度了。因此，节约大范围照明（如道路照明）耗电很重要，通过正确投资和使用现有技术将可能实现减少 60% 的户外照明电能消耗（欧洲整体来说，60% 代表 36TWh/年）；同时还可以大幅度降低维护成本^[29]。

8.5.1 高效光源和灯具

目前，高强度放电（HID）灯是道路照明的主要选择，HID 灯包括高压钠（HPS）灯、低压钠（LPS）灯、金属卤化物（MH）灯和汞蒸气灯^[30]。根据参考文献 [6]，62% 的户外照明使用 HPS 灯和 LPS 灯，30% 使用汞蒸气灯，6% 使用 MH 灯，剩余 2% 使用卤素和白炽灯。HPS 灯在户外照明的使用最多，主要有以下两个经济原因：较低的初始成本和运营成本。除了这些经济优势，MH 灯照明系统也被大众认可，在很大程度上因为它们系统总成本（包括初始成本和运营成本）越来越低，更具竞争力。另外，MH 灯夜间照明效率更高，因为在相同功率中，MH 灯光谱特性与人类视网膜感光光谱特性一致性更高^[31]。

汞蒸气灯已经过时了，而且耗能比 HPS 灯和 MH 灯大，导致业主使用成本高。如果所有的欧洲低效的汞蒸气灯道路照明都更新成最新技术，欧洲将节省 10 亿欧元运行成本（基于 2006 年电价）^[32]。这相当于：

- 1) 4 百万 t CO₂；
- 2) 每年 1400 万桶油；
- 3) 相当于消耗 2 亿棵树。

最近这几年，LED 照明作为一种节能灯备受关注。LED 道路照明只需要 30% ~ 50% 的 HID 灯照明所耗的电能，而且 LED 灯寿命是 HID 灯的 3 倍多^[33]；更换损坏灯具所需时间将减少，而且 LED 系统基本上是免维护的照明灯具。LED 灯

的其他优势：不含汞、铅，不存在其他已知的处置风险，即时启动和没有重启延时。其二，尽管 MH 灯和 HPS 灯技术一直在逐渐进步，但是 LED 技术在光效率、颜色质量、视觉设计、热管理和成本方面持续飞速发展^[33]。在这种背景之下，随着近几年光照效率的巨大进步，LED 照明将很快替代之前使用的光源。然而，目前不同的制造商的 LED 产品质量差异很大，所以选择和使用 LED 灯时应该特别注意这一点。LED 灯的性能对热和电气设计极其敏感，这一缺点可能导致灯光照度快速衰减或过早失效。再者，LED 还处在技术发展早期阶段，尚缺失 LED 长期工作的性能数据。

提高户外照明系统的能效不能只靠简单选择高效的灯。事实上，户外照明系统的能效还包含了灯具的透光率，以及灯具如何将光投射到目标区域而不是投向非目标区域。户外照明的目的是为目标区域提供合适的照明质量，并且唯有有效光源与透光率高的灯具才可以达到最佳的照明效果。灯具不同在于它们的光学性能不同。户外灯具光度测量报告通常阐述向下灯具的效率和进一步细化为“街边”和“房屋边”灯具的效率^[34]。光学反射镜式灯具由于高输出率和蝙蝠翼式配光，使得其可以节省更多的能源。同时，应该确保灯具使人不舒适的眩光和遮幕反射最小。照明系统的布置和灯具的安装对提高其能源效率也非常重要。总之，灯具固定在最佳高度和使用光学反射镜式灯具能提高能源效率。

LED 灯和 MH 灯或 HPS 灯使用不同的光学器件，因为事实上，每一个 LED 灯就是一个独立的点光源。有效的灯具设计可以实现 LED 灯光照的方向性，降低光损耗，提高灯具效率，精确区分背光面和迎光面的分界，使整个目标区域的光分布更均匀。相比 HID 灯的照明灯具，LED 灯和紧密耦合光学器件可以提高表面照度的均匀性和增加垂直方向照度水平。这种特殊设计具有以下优势：

- 1) 在 $70 \sim 90^\circ$ 的垂直角度上，降低发光强度，避免眩光和光侵扰。
- 2) 在 $90 \sim 100^\circ$ 的光强度时最小或为零，因为这个角度区间对天空散光作用最大。
- 3) 在 $100 \sim 180^\circ$ （极点）之间，降低光强度，因为这个角度区间对天空散光同样有作用。

在参考文献 [34] 中记录了一些 HID 灯与 LED 灯之间的比较数据，其中强调了设计良好的 LED 灯对户外照明的潜在优势，如下：

- 1) 一致性提高 2 倍多。
- 2) 更好的控制灯光照度。
- 3) 提高均匀度。

再者，由于 HID 灯在近光源附近的光照度极高，导致在灯下的区域照度比离灯远的区域照度高。这种过度照明造成能源浪费，而且降低了可视度，因为当眼睛从较亮的区域到较暗的区域需要强迫眼睛去调节。相反的，LED 灯就要好很多，多点光源和方向性的特点可以实现更好地控制光分布。

欧盟在生态设计要求中，针对户外照明提出以下具体规定^[21]：

1) 提出了对 HID 灯等的最低要求，包括根据一个双方同意的停止使用高压汞灯的时间表，要求功率最大的灯先停止使用。

2) 提出了最低光通维持水平。

3) 90% 的 HPS 灯的使用寿命必须超过 16000h。

4) 金属卤素灯使用寿命必须超过 12000h，以 80%（被覆盖的）和 90%（纯净的）照明输出损耗为标准。

5) 为了减小光污染，规定道路照明灯具（不只包括 HID 灯）的灯光具有方向性。

6) 对所有的 HID 灯，明确了新的最低性能要求，以使汞含量最小。

针对户外照明系统改造提出了如下建议：

1) 用更高效的灯替代汞蒸气灯。

2) 用更高效的灯具（如脉冲启动 MH 灯）替代探头启动 MH 灯。

3) 当需要更高的照度时，在重视颜色的照明场合安装 MH 灯。

4) 当显色要求不高时，安装高压钠蒸气灯。

5) 确保市场上的 HPS 灯和 MH 灯效率达标，且与合格镇流器和照明控制相配合使用。

6) 更高的流明效率。

7) 根据标准的测量规程，所有灯具提供其光学性能，并且应该能够被测量。如果没有标准的测量规程，则需要建立这样的规程。

8) 除非强烈与审美观相冲突，户外照明灯具一般应该使用单一规格的灯具，避免光线相互干扰，减少光污染。

9) 更好的控制系统。

最后，在室外照明系统也需要注意电能质量。一方面，所有的 HID 灯都是非线性负荷，它会产生谐波电流^[35]；另一方面，所有的单相负荷灯产生三相电源系统的不平衡。这些电磁干扰在所有的线路和中性导体中产生附加功率损失^[36,37]。对于大型户外照明系统，这些附加损耗可能是无法被接受的，为了减轻所产生的干扰，必须采取措施。过大的压降也可能是电源线过长所导致的。

8.5.2 户外照明控制

目前，户外照明控制系统既有十分简单的控制技术又有最现代化的控制技术。光照亮度取决于法律规定、柏油路、交通流量、道路类型、速度限制和环境因素。当这些因素中的某一个在夜间发生变化时（如交通流量、速度限制），通过降低灯具上的电压减少灯具照度甚至直接关闭灯具。然而电压减少是有限的，因为通常物理电压降是电缆长度的函数。对于灯来说，在其末端安装电缆来降低电压的作用是有限的。为了估算户外照明的节能情况，需要独立分析这些受影响灯具的安装结构条件。

8.5.2.1 (HID) 灯调光

一般来说,对 HID 灯进行调光可以节省能源,降低电能高峰需求,增加多用途空间使用的灵活性。为了实现调光,首先调光可以通过手动调节(通过调节开关)或自动调节(通过控制装置,比如计时器、占有传感器、光电池)来实现;其次在峰值需求阶段使用可编程序时间控制器确定调光时间表。值得注意的一点是:考虑到高强度放电灯的特点(如果每次点亮灯具后照明时间低于 10h 就关闭,将导致较长的预热时间和显著短缩灯具生命周期),通过熄灭和重启 HID 灯来调光并不是一个可行方案。相反,如果运用占有传感器或者可编程序时间控制器的信号来调光,不仅可以显著节能,当再次使用这一场所时,灯具将很快恢复到最大亮度。HID 灯可以使用步进调光也可以无级调光^[38]。

1) 步进调光方式是通过降低灯的功率,通常从额定功率的 100%降低到 100%和 50%之间另一级功率水平,因此这种方案也称为两级调光系统。根据灯具种类和功率大小,在两级调光系统中,低级亮度可达到 15%~40%的灯具亮度,即 30%~60%灯具的额定功率(由此可以节约 40%~70%的能源)。市场也有 3 个固定级别的三级调光系统,这个系统为多功能场所提供了更大的灵活度。这种调光方法通常使用恒压源自耦变压器、电感镇流器和一个或两个附加的电容器,电容器的多少取决于镇流器提供的是两级还是三级调光。电容器的继电器开关会产生附加阻抗,将降低灯具电流和功率。电容器电路配置可以是并联或串联方式。

与无级调光系统相比,步进调光系统更便宜且允许对每个灯具单独控制(适用于灯具更换)。另外,专用占用传感器和调光镇流器适合直接更换。步进调光的理想应用场所包括一些长期不被使用但仍需要照明的场所,如停车场、仓库、超市和商场。需要注意的是,当调光降到额定功率的 50%以下时,灯具寿命(生命周期的 90%)、效率、颜色和光通维持率都会衰减,甚至熄灭。于是,国际电气制造业协会(NEMA)建议最大的 MH 灯和 HPS 灯的调光为灯具额定功率的 50%。

2) 无级调光(线电压)可以平滑连续减小灯具功率,这个技术在任何需要调光范围大的场所都有很大优势。其控制系统有 3 种:

① 可变变压器:减小镇流器初始电压,减小亮度输出和用电输入(实现额定功率减小 50%)。

② 可变电抗器:不需要改变灯具电压而改变灯具电流(实现额定功率减小 50%)。

③ 电子控制电路:改变镇流器的输入电流和电压波形实现额定功率减小 50%。

所有控制方案都是通过使用大型的、低效的和易受电压波动干扰的电磁镇流器。电子镇流器可以克服这些缺陷,并为照明控制提供了更大的可能性。使用电子镇流器的 HPS 灯有 3 种主要调光方式^[18]:①改变逆变器的工作电压;②改变逆变器的工作频率;③改变逆变器输出信号(PWM)的脉冲宽度。改变逆变器输出电压或频率都很容易实现,但是灯具输出颜色会被影响。改变逆变器输出信号

(PWM) 的脉冲宽度更复杂, 但是光线颜色输出受到的影响很小。对于 HPS 灯, 无论用什么镇流器, 调光范围都有限, 甚至在调整到额定功率的 50% 时, 灯光颜色就会受影响而改变。

一些制造商为 MH 灯提供固态电子镇流器, 声称这些镇流器体积更小、性能更佳、功率因数更高、节能效果好、发热量小, 并且与电磁镇流器相比其维护成本更低。这些镇流器更适合小于 150W 的灯具使用。

在所有情况下, 输出光照强度的较少量比降低的能耗 (功率) 多。总体上, 输出光照强度的减少量大约是 MH 灯照明系统功率降低的 1.2 ~ 1.5 倍, 大约是 HPS 灯照明系统功率降低的 1.1 ~ 1.4 倍。

8.5.2.2 LED 调光

LED 灯在控制和使用方面具有许多优势。LED 灯使用一个微控制器可以控制 LED 阵列中的每一个发光二极管, 控制灯光照度水平 (调光) 和显色性。调光器通过减小正向电流和数字控制的 PWM 或者更复杂的方法, 可以将 LED 灯亮度在 0 ~ 100% 的范围内任意调节。因为 LED 灯输出亮度最大时其工作电压和电流始终相同, 这意味着调光时并不会造成 LED 灯效率低。另外, 与 HID 灯不同的是, LED 灯的寿命并不因调光而缩短。因为调光可以降低 LED 灯的内部温度, 调节 LED 灯亮度也许可以加长 LED 灯的使用寿命。随着 LED 灯的控制技术不断发展, 我们可以看到, 这将成为照明领域的巨大创新。调光、颜色控制以及融合占有传感器技术和光电控制, 将为 LED 提高效率 and 用户满意度。

8.5.2.3 数字照明控制系统

现代数字照明控制系统致力于把灯具调光功能结合到更复杂的管理系统, 管理系统包含了 3 个主要元素^[40]:

- 1) 照明灯具的控制单元;
- 2) 每个配电板中的 CPU 和 GSM 模块;
- 3) 管理和控制独立照明设备的远程数据处理器。

在应用数字照明控制系统的情况下, 现代交通监控技术可以优化照明控制: 照明系统必须考虑满足最糟糕条件下的照明需求, 同时也需要能够自动满足当前照明需求。如果一个照明系统的照明水平可以根据预设的参数, 例如时间、交通密度、天气条件等进行调节, 这样的照明系统可称为“自适应照明系统”或“动态照明系统”; 如果照明系统的输出照度水平可以根据实际需求实时调整, 这样的系统可以称为智能照明系统。智能道路照明系统是一个基于计算机科学、通信、自动化和电力技术的现代照明控制系统, 该系统可以自动收集系统信息并进行分析、推论、判断, 最终通过根据实际需求实时改变输出灯光的亮度而实现最优化照明控制效果^[18]。它的主要目的是在保证交通安全的情况下节约电能和降低维护成本。从照明方面看, 也就是根据交通和天气条件, 照明系统提供最优化照明效果。

数字照明控制系统不仅可以从一个装置上控制每一个照明设备, 并且可以在线

获取每一个照明设备的状态以及包含具体故障检测的各种信息。数字照明控制系统可以节省 30% 的电能和 40% 的维护成本。数字照明控制系统的投资成本很高, 尤其是通过改造升级照明系统的方式, 需要独立估计投资回报周期^[40]。

通信是智能道路照明系统的关键。当一个控制中心离远程控制单元和照明设备较远时, 必须使用不同的通信方案。无线通信, 例如无线电广播和 GSM/GPRS, 由于高传输速率和高性能, 适用于大范围 and 长距离通信, 但这些无线通信运营成本相对较高。根据预算情况, 有线通信, 例如光纤、电话线甚至电力载波通信, 也都是潜在的通信方案。光纤通信成本高, 但其传输速率高且通信容量大; 电话通信是一个经济的方案, 但其传输速率低且通信容量小; 由于有现成的通信线路, 电力线通信经济实惠, 但其易受干扰。通信系统的选择取决于具体使用情况、通信要求和预算。对于一个具体使用场合, 有唯一合适的通信方案, 但是没有适用于所有场合的通信方案^[18]。

总之, 智能自适应照明显而易见的优势是: 减少能耗和获取当前照明设备状态。这样照明控制系统可以更好地控制照明设备以及确保照明设备能够为用户提供所需要的照度, 提升道路照明服务质量^[29]。控制系统越好其预测性越强, 进而减少系统的运行维护成本。自适应照明包括照明灯具的能量测量, 自动调整电力参数、照明时间以及照明水平。如果照明系统同时实现测量功能和控制功能, 其通信费用将减少, 系统中设备数量也将最少, 同时将降低成本、简化系统运行和维护工作。

8.6 照明系统维护

对于所有的照明系统, 随着使用时间越长, 照明系统总体工作性能也将降低。照明系统衰减可能是由于灯具照明输出衰减、灯和镇流器老化、灯具和光源上聚集灰尘、灯具表面老化、房间表面灰尘和其他因素造成的, 综合起来这些影响因素会使照明性能降低 20% ~ 60%^[18]。因此, 所有照明装置都需要维护以便使其发挥最大工作效率。

想要从照明系统的设计上来弥补照明装置的维护不足的缺陷会浪费光能, 因为此办法使照明系统初始阶段提供的照度将大于实际照明需求。如果设计阶段中考虑未来的装置维护条件, 将导致设计过多的照度余量。在某些情况下, 甚至会使不必要的光损耗高达 40% ~ 50%, 这意味着初始运行阶段这种照明系统的照明输出将比实际需求高 40% ~ 50%^[16]; 如果使用合理的控制系统, 就可以减小能量损耗。考虑以上方面以及劳动成本, 在照明设备的初始运行周期中其维护周期应该经常调整, 以确定其最佳维修周期。

最经济的更换灯具和清洁灯具的时间间隔由以下因素决定^[16]:

- 1) 照明场所类型: 照明装置的实际需求管理 (例如维持照度水平需求是高还

是低、是否有专门人员负责管理照明灯具等)。

2) 照明场所位置：影响光源的灰尘聚集比率的因素。

3) 特定场所的使用率和现有控制方法：影响灯具使用寿命的因素。

4) 灯具种类：影响灰尘聚集的因素、使用损耗、清洁灯具所需劳动成本。

5) 灯的类型：灯照明衰减特性和灯的平均寿命。

6) 电能和劳动成本：灯具维护时间表的关键经济因素（根据参考文献 [40]，以 25 年的服务周期为例，通常道路照明灯具总成本中 85% 为维护 and 电能成本，只有 15% 是投资成本）。

从维护角度看，一个一个更换坏掉的灯具也许不经济，因为其更换灯具的劳动成本高而灯具损坏是随机的。因此，最有效的方法是在一个经济的灯具生命周期中成批更换灯具。因此，智能道路照明控制系统在最优化照明维护中有巨大作用：

1) 根据照明时间以及灯具类型预测灯具寿命，规划成批更换灯具时间间隔。

2) 控制中心可以及时检测灯具故障（因此可以减少工作时间、反应时间和检查频率）。

3) 可以通过照度测量仪表或光输出传感器、控制系统调整光强以便达到合适的光照强度。

参 考 文 献

- [1] N. Lefèvre *et al.*, *Barriers to Technology Diffusion: The Case of compact Fluorescent Lamps*, International Energy Agency, COM/ENV/EPOC/IEA/ SLT(2006)10, <http://www.oecd.org/env/cc/aixg>.
- [2] European Lamp Companies Federation, *The European Lamp Industry's Strategy for Domestic Lighting. Frequently Asked Questions & Answers on Energy Efficient Lamps*, 2007, <http://www.clcfd.org>
- [3] B. Jacob, Lamps for improving the energy efficiency of domestic lighting, *Lighting Res. Technol.*, **41**, 2009, pp. 219–228.
- [4] D. R. Limaye *et al.*, *Large-Scale Residential Energy Efficiency Programs Based on CFLs*, Project P114361 (2009), <http://www.esmap.org>
- [5] D. L. Loe, Energy efficiency in lighting – considerations and possibilities, *Lighting Res. Technol.*, **41**, 2009, pp. 209–218.
- [6] International Energy Agency, *Light's Labour's Lost. Policies for Energy-efficient Lighting. In support of the G8 Plan of Action*, <http://www.iea.org/textbase/npsum/III.pdf>
- [7] R. Van Heur, *Power Quality and Utilisation Guide*, Energy Efficiency, 2007, <http://www.leonardo-energy.org>
- [8] B. Atanasiu and P. Bertoldi, Analysis of the electricity end-use in EU-27 households, *Proceedings of the 5th International Conference EEDAL'09*, Berlin, Germany, pp. 189–201.
- [9] P. Bertoldi, Energy efficiency in lighting & project of EU quality charter for LED lighting, *CELMA/ELC LED Forum*, Frankfurt, 2010.
- [10] N. Anglani *et al.*, Energy efficiency technologies for industry and tertiary sectors, the European experience and perspective for the future, *IEEE Energy2030* Atlanta, GA, USA, 2008.
- [11] W. C. Turner and S. Doty (eds), *Energy Management Handbook*, 6th edn, The Fairmont Press, 2007.
- [12] R. Mehta *et al.*, *LEDs – A competitive solution for general lighting applications*, *IEEE Energy2030*, Atlanta, GA, USA, 2008.
- [13] T. Yoshihisa, Energy saving lighting efficiency technologies, *Quarterly Review*, **32**, 2009, pp. 59–71.
- [14] National Framework for Energy Efficiency (Australia), *The Basics of Efficient Lighting. A Reference Manual for Training in Efficient Lighting Principles*, 1st edn, 2009, <http://www.enrgyrating.gov.au/wp-content/uploads/2011/02/2009-ref-manual-lighting.pdf>

- [15] EN200212 CELMA Ballast Guide, <http://www.cu-greenlight.org/pdf/BallastGuideEN200212.pdf>
- [16] EMSD Hong Kong, *Guidelines on Energy Efficiency of Lighting Installations*, 2007, <http://www.emsd.gov.hk>
- [17] P. Waide, *Phase out of Incandescent Lamps. Implications for International Supply and Demand for Regulatory Compliant Lamps*, IEA, Energy Efficiency Series, 2010, <http://www.iea.org>
- [18] L. Guo *et al.*, *Intelligent Road Lighting Control Systems*, Helsinki University of Technology, Department of Electronics, Lighting Unit, Report 50, Espoo, Finland 2008, <http://www.lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512296200/article2.pdf>.
- [19] C. DiLouie, *Fluorescent Magnetic T12 Ballast Phaseout: It's Time to Upgrade Existing Lighting and Control Systems*, 2010, http://www.aboutlightingcontrols.org/education/papers/2010/2010_lighting-upgrades.shtml
- [20] Energy Saving Trust, *Energy Efficient Lighting-Guidance for Installers and Specifiers, CE61* (2006), <http://www.est.org.uk/housingbuildings>
- [21] P. Bertoldi and B. Atanasiu, *Electricity Consumption and Efficiency Trends in European Union – Status Report 2009*, <http://www.jrc.ec.europa.eu>
- [22] O. Soumonni, *Lighting Energy Efficiency Potential in Georgia: a Technology and Policy Assessment*, Georgia Institute of Technology, 2008, <http://stip.gatech.edu/wp-content/uploads/2010/05/intern08-diran-report.pdf>
- [23] Zumtobel Staff, *The Lighting Handbook*, 1st edn, 2004, <http://www.zumtobelstaff.com>.
- [24] EN 61000-3-2 Electromagnetic Compatibility. Limits. Limits for Harmonic Current Emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase).
- [25] Architectural Energy Corporation, Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool, 2006, http://www.archenergy.com/SPOT/SPOT_Daylight%20Autonomy%20Report.pdf
- [26] A. Cziker, M. Chindris and A. Miron, Implementation of fuzzy logic in daylighting control, *11th International Conference on Intelligent Engineering Systems INES2007*, 2007, Budapest, Hungary, pp. 195–200.
- [27] A. Cziker, M. Chindris and A. Miron, Fuzzy controller for a shaded daylighting system, *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment OPTIM'08*, 2008, Braşov, Romania, paper 586.
- [28] S. L. Wong *et al.*, Artificial neural networks for energy analysis of office buildings with daylighting, *Applied Energy*, **87**, 2010, pp. 551–557.
- [29] Intelligent Energy Europe, *Guide for Energy Efficient Street Lighting Installations*, 2007, http://www.e-streetlight.com/Documents/Homepage/0_3%20Guide_For%20EE%20Street%20Lighting.pdf
- [30] M. Chindris *et al.*, A new policy in public lighting of Cluj-Napoca, *4th European Conference on Energy-Efficient Lighting*, 1997, Copenhagen, Denmark, 1, pp. 229–232.
- [31] M. S. Rea *et al.*, Several views of metal halide and high-pressure sodium lighting for outdoor applications, *Lighting Res. Technol.*, **41**, 2009, pp. 297–320.
- [32] BeneKit, *Storybook Efficient White Light – Think Inside the Box*, 2007, <http://www.lighting.philips.com/microsite/beneki/index.php>.
- [33] Y. Aoyama and T. Yachi, An LED module array system designed for streetlight use, *IEEE Energy2030*, Atlanta, GA, USA, 2008.
- [34] EERE Information Center. Building Technologies Program, *LED Application Series: Outdoor Area Lighting*, 2008, <http://www.nctl.doc.gov/ssl>
- [35] F. Pop and M. Chindris, Analysis of the Harmonic Distortion of the Public Lighting Network, *8th European Lighting Conference*, Amsterdam, 1997.
- [36] M. Chindris *et al.*, Neutral currents in large public lighting networks, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'04)*, 2004, Barcelona, Spain (paper 210 on CD).
- [37] M. Chindris, A. Cziker and A. Miron, Computation of power losses in public lighting networks, *4th International Conference ILUMINAT2007*, 2007, Cluj-Napoca, Romania, pp. 8.1–8.6.
- [38] C. DiLouie, *HID Lamp Dimming*, 2004, ecmweb.com/mag/electric_hid_lamp_dimming
- [39] C. DiLouie, Controlling LED lighting systems: introducing the LED driver, *LEDs Magazine*, December 2004, <http://www.ledsmagazine.com/features/1/12/6>
- [40] Intelligent Energy Europe, Energy Efficiency in Streetlighting and Transport Infrastructure. Reference material from COMPETENCE, http://www.transportlearning.nct/competence/docs/Competence_reference%20material_urbanesign.en.pdf

深入阅读材料

- P. Bertoldi *et al.* *The European GreenLight Programme 2000–2008 – Evaluation and Outlook*, 2010, <http://www.jrc.ec.europa.eu>
- M. Bross and A. Pirgov, Do new types of energy saving lamps change the markets?, *Proceedings of the 5th International Conference EEDAL'09*, Berlin, Germany, pp. 612–621.
- Bureau of Energy Efficiency, *Lighting System – Guide Book*, <http://www.em-ea.org/Guide%20Books/book-3/Chapter%203.8%20Lighting%20System.pdf>
- Department of transportation, *Minnesota Roadway Lighting Design Manual*, 2003, www.dot.state.mn.us/trafficeng/lighting/lightingdesignmanual.pdf
- Electronic Ballasts Market Forces and Demand Characteristics*, 5th edn, Darnell Group, January 2009.
- S. Fassbinder, *How Efficient are Compact Fluorescent Lamps?*, 2008, <http://www.leonardo-energy.org>
- W. L. O. Fritz and M. T. E. Kahn, Energy efficient lighting and energy management, *Journal of Energy in Southern Africa*, **17**(4), 2006, pp. 33–38.
- R. N. Helms and M. C. Belcher, *Lighting for Energy Efficient Luminous Environments*, Prentice Hall, 1991.
- HERA, *LED – The Future of Energy Efficient Lighting*, 2010, <http://www.hera-online.de>
- HOLOPHANE, *Lighting Guide. The Fundamentals of Lighting*, 2010, <http://www.holophane.com>
- K. Johnsen and R. Watkins, *Daylight in Buildings*, ECBCS Annex 29/SHC Task 21 Project Summary Report, 2010, <http://www.echcs.org>
- N. Khan and N. Abas, Comparative study of energy saving light sources, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 2011, pp. 296–309.
- Lighting Industry Federation Limited: Lamp Guide 2001*, UK, <http://www.lif.co.uk>
- G. Logan, *Lighting Efficiency Standards in the Energy Independence and Security Act of 2007: Are Incandescent Light Bulbs Banned?*, CRS Report for Congress, 2008, <http://www.policyarchive.org/handle/10207/bitstreams/18981.pdf>
- MEMO/09/368 (Brussels 2009), FAQ: phasing out conventional incandescent bulbs, http://www.energy.eu/DG-TREN-releases/MEMO-09-368_EN.pdf
- Sustainability Victoria, *Energy Efficiency Best Practice Guide. Lighting*, <http://www.sustainability.vic.gov.au>
- P. Van Tichelen *et al.*, *Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs*, Final Report, Lot 8, Office lighting, 2007/ETE/R/115, http://www.eup4light.net/assets/pdffiles/Final/VITO_EuP_Office_Lighting_Projectreport.pdf
- P. Van Tichelen *et al.*, *Preparatory Studies for Eco-design Requirements of EuPs*, Final Report, Lot 9, Public street lighting, 2007/ETE/R/021, http://www.eup4light.net/assets/pdffiles/Final/VITOEuPStreetLighting_Final.pdf
- Washington State University Cooperative Extension Energy Program, *Daylight Dimming Controls*, 2003, http://www.energy.wsu.edu/ftp-ep/pubs/building/light/dimmers_light.pdf

第 9 章 电气驱动和电力电子

Daniel Montesions – Miracle、Joan Bergas – Jané 和 Edris Poures maeil

电力电子技术在电气系统的节能减耗方面扮演着重要角色。电力电子学的研究使得可再生能源技术逐渐成熟，例如光伏发电、风能以及燃料电池系统等，为了不对电网造成影响，这些能源必须严格符合电网标准，还包括一些很有规律而不至于扰乱电网的能源类型。

电力电子学涵盖的范围越来越广，高压直流（HVDC）输电系统和静止同步补偿器（STATCOM）在配电系统中的使用就是基于电力电子技术的两个实例。

同样，在能量储存系统中，电池、飞轮以及超导磁储能器（SMES）能够正常运转也正是因为有电力电子技术作为支持。除此之外，无论便携与否，电力电子技术确实已经渗透在各类电气和电子设备中。

电力电子技术在能量转换中的作用是控制能量。当然，要做到这些不仅要符合电气特性，同时也应具备较高的运行效率。现如今，电力电子技术和控制装置已经可以同时满足这两种需求。

电力驱动装置是工业生产中最主要的耗能设备之一。在大多数工业过程中必须运用一些装置将电能转换成机械能，比如工业制造、泵抽送、风机旋转以及高压交流（HVAC）输电系统中的压缩机的工作等。

在欧洲，电动机驱动系统消耗 30% 的电能，占整个工业耗电的 60%，这些数据反映了降低电力驱动设备的能耗在能源节约工作中的重要地位。为了降低电力驱动设备的耗电量，相关人员正在进行大量的研究并已经采取了相应措施。由欧盟委员会提出的“电动机挑战计划（MCP）”旨在促进整个行业提高电动机驱动系统的能源利用率，这一倡议在过去的数年内取得了巨大成效。

在电动机驱动的应用中，与基本花费和维护费用相比，系统对能源的消耗才是最主要的成本，因此减少能耗对于节约能源和降低成本都有着非常重要的意义。

图 9.1 和图 9.2 所示是运用电力驱动装置减少泵送系统能耗的方法。传统泵送系统（见图 9.1）通过调节阀门的方式控制液体的流量：首先，电泵由一台直接连接在电网上的电动机驱动，将能量最大限度地转化为流体能量；然后利用阀门排除多余的能量来达到调整流量的目的。这样的系统效率并不高。

为了提高能源利用率，只将必需的能量转换为流体能量才是更加合理的做法，如图 9.2 所示。然而为了实现定量转换，就需要为泵机或扇叶提供一个可变的转速，这就只能通过更改驱动电动机的转速实现了。由于电网的频率和振幅是固定不

变的，因此需要在电网和电动机之间接入一种新型的接口部件来为电动机提供所需的电压频率和幅值。这个部件就是变速驱动器（VSD）。

VSD 是一种电力电子设备，通过它来控制电网传送到电动机的能量，最终达到控制流体能量的目的。VSD 可以实时地调整系统所需的电压频率和幅值，只将所需电能转换为流体能量。

VSD 不仅是为电动机提供所需电压频率和幅值的装置，同时也可以看作电动机的保护器。它们可以缓慢启动，以减小输入线和转换器受到的压力，并可以避免过度设计。

此外，VSD 系统可以作为分布式控制系统，因为通常它也包含一些自动化特征，包括模拟或数字通信总线。

考虑到加入任何新元件都将会增加系统消耗的应用，必须将反馈分析引入其中。反馈在很大程度上依赖于占空比和能耗，可以从 8 个月到 2 年不等。即便考虑 2 年这种最差情况，这种技术也很有意义，既节省了开支又降低了 CO₂ 的排放。

感应电动机（也叫异步电动机）在工业应用上作为主流电动机已经有很多年了。感应电动机相对于其他电动机的优势也是众所周知的：第一个是它的价格，这得益于其简单的设计、简单的加工方式以及使用的低成本材料；另一个是它不需要任何控制装置，可以直接接入电网，具体实现如图 9.1 所示。

价格实惠的电力电子设备和变速设备是过去 20 年间的新兴产品，同时在这 20 年里，运用电力电子学的新型电动机技术也已经出现。

PMSM 是一种转子上带有磁性物质的同步电动机，而不是像传统同步电动机那样采用绕组式。这些带有永磁材料的电动机相对于感应电动机有很大优势。永磁同步电动机比电磁感应电动机的效率更高，因为它们不需要励磁电流^[2]。由于没有转子绕组，没有转子损耗，散热设计也比感应电动机更加简单。另外，转子的惯量可以设计得更低，从而增加转矩惯量比。这就是这种电动机能够在伺服系统和机器

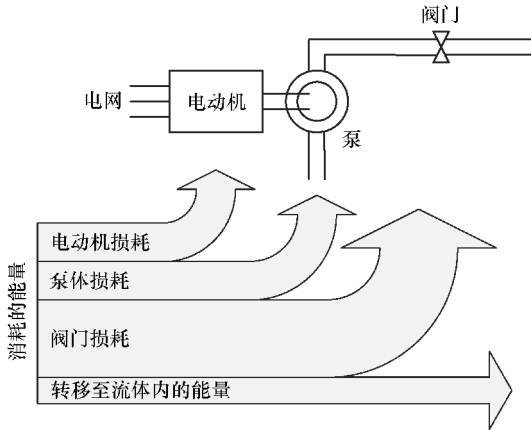


图 9.1 传统泵送系统中的能量损耗

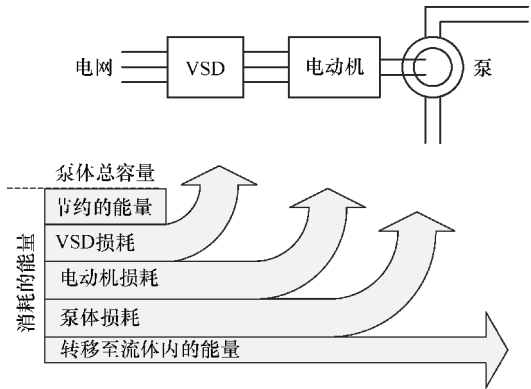


图 9.2 应用 VSD 的节能泵送系统

人等伺服系统的应用中占据主要地位的原因。

然而,这种电动机仍然存在不足。永磁材料的价格相对较高,并且这种电动机对位置传感器和电力电子设备系统有相应的需求。永磁同步电动机不可以直接接入电网,原因是电动机在低于额定速度下运行时会变得非常不稳定。

提高 VSD 能源使用效率的方法有很多种。首先是应用控制方法提高效率。不同的控制策略虽然产生的运行效果相同,但是其效率截然不同,所以需要采用最高效的控制方案。但是高效率的控制方案需要更高配置的计算机,这也增加了成本开支。

从变频器的角度看,影响系统效率主要有三方面原因:一是变频器的拓扑结构;二是调制技术;三是半导体器件。

变频器的拓扑结构会影响驱动效率,好的拓扑结构可以降低电动机当前的谐波,从而降低损耗和转矩脉动,同时也降低了半导体器件上的压力,而且可以用低压控制半导体器件,这样效率更高。常用的拓扑结构有多电平变换器和矩阵式变换器。

调制器的作用是聚集高质量正弦电压提供给电动机。目前已经提出了很多不同的调制方法,而电动机和变换器效率的提高很大程度上取决于使用了哪种调制方法。

在电力电子设备里,转换装置就是作为开关使用的半导体器件。此时半导体器件不能够工作在线性区域内,因为那样会产生很高的损耗。半导体器件在饱和状态、运行过程以及转换过程中同样要考虑其损耗,这些损耗可能会引起半导体器件发热甚至损坏。在这种情况下,和电动机一样,由于热局限性就需要增设散热装置。由此可以发现,对半导体的研究主要就是减小传导和转换时的损耗、增加半导体的耐热程度、减小散热系统的能量消耗,从而最终提高系统的驱动效率。

最常用于生产半导体器件的材料就是硅,也存在多种不同的制作工艺。新型半导体材料包括碳化硅、氮化硅甚至金刚石,这些都是具有低损耗、高耐热性质的材料,这些材料在此行业中的使用也是今后半导体器件的发展趋势。

电力传动通常用于驱动模式,但是有时候也取决于具体应用,也可以用于制动模式。制动是产生电能的过程:它通过机械传动将能量传给电动机,然后转换成电能。

变速驱动时必须要考虑这种能量,通常此类能量都被消耗在电阻上,但是新技术的诞生使这种能量可以储存在超级电容器或电池里,也可以反馈给电网,甚至可以直接提供给另一台处于工作状态的驱动器。

本章将主要介绍驱动器的一些改进。

9.1 感应电动机和 PMSM 的控制方法

对感应电动机和 PMSM 进行控制的方法有很多,但是这里只介绍 3 种在工业中

应用较多的方法。 V/f 控制法也叫标量控制法，是基于电动机的稳态电力方程的一种控制方法。这种方法能直接控制电动机产生的转矩，因而主要用于不需要高动态性能的场所，例如暖通空调系统（HAVC）、泵类以及风机。

对于高动态性能的应用，如伺服系统和机器人，矢量控制法或直接转矩控制（DTC）法更加有效，这些方法基于状态矢量空间运动方程，可以提供转矩控制。这种控制方法的使用要求系统具有更高的计算能力和传感能力。

9.1.1 V/f 控制

V/f 控制基于感应电动机的单相等值电路模型，如图 9.3 所示，运行在平稳状态下。

如图 9.3 所示的等效电路中转矩可以表达如下：

$$T_{em} = \frac{P_m}{\omega_m} = 3I_r' \frac{1-s}{s} R_r' \quad (9.1)$$

运动学方程为

$$u_s = R_s i_s + j\omega_s \lambda_s \quad (9.2)$$

式中 u_s ——应用电压；

R_s ——定子电阻；

i_s ——定子电流；

ω_s ——定子电压频率；

λ_s ——定子磁链。

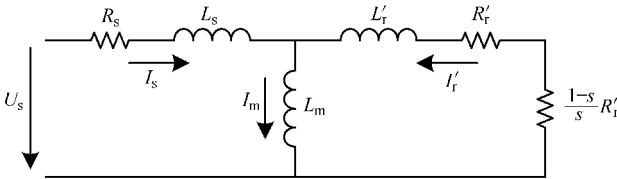


图 9.3 感应电动机的单相等值电路模型

由式（9.2）可知，标准定子励磁可以表示为

$$u_s = \sqrt{(R_s i_s)^2 + (\omega_s \lambda_s)^2} \quad (9.3)$$

忽略定子电阻和常量定子磁链，式（9.3）可以简化为

$$\frac{u_s}{\omega_s} = \lambda_s = ct \quad (9.4)$$

在 V/f 控制中，可以认为磁链 λ_s 在整个速度范围内是常量。

应用电压和应用频率是线性关系，如图 9.4 所示。随着频率升高，由于变换器的电压容量是有限的，当达到额定转速后，电压变为常量。

在低速运行状态下，不能忽略电阻对式（9.3）的影响，此时为了得到常量，需要给电动机提供一些额外电压，如图 9.4 所示。额外电压的大小取决于电动机的

负荷电流 [见式 (9.3)]。

图 9.5 所示是 V/f 控制法的框图。该算法按所需频率的比例计算电压幅值。可以在这里加入电阻的降压补偿，但是必须进行电流测量。电压的幅值和频率被用在调制器中，为电源变换器合成转换信号。

电动机与电网直接相连是 V/f 控制中的一种特殊情况，但是通过接入 VSD，增加了软启动、保护以及调速等特征，就可以将这种特殊情况扩大至整个速度范围。

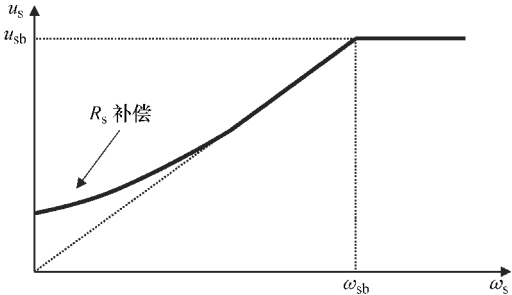


图 9.4 V/f 控制中的电压 - 频率特性
(从图中也可看出电阻电压降补偿)

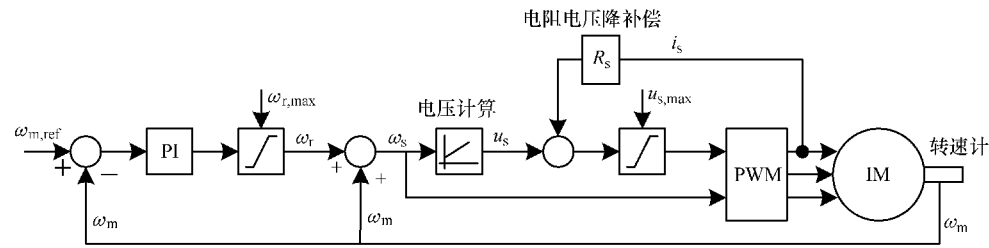


图 9.5 V/f 控制的组成框图

由于这种控制方法实施起来比较容易，在引入这些特征之后有更好的效果，因此这种控制方法也是现在最常用于控制感应电动机的方法之一。

由于感应电动机是异步电动机，其转子转速与定子旋转和磁场转速不同，转子转速的大小取决于负荷情况。可以用转差率 s 表达电动机转速与旋转磁场转速之间的关系，其表达式如下：

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \tag{9.5}$$

式中 ω_m ——电动机转速。

图 9.6 所示的是感应电动机的转矩 - 转速特征。为了确保能够在曲线所示的稳定区域内运行，限制最大转差率，可以将一个 PI 控制器加进外环，如图 9.5 所示。这个控制器不但可以保证电动机以准确的速度平稳地运行，还可以作为电动机的电流保护器，这是由于转子速度和电流（或转矩）具有一定的相关性，如式 (9.3) 和图 9.6

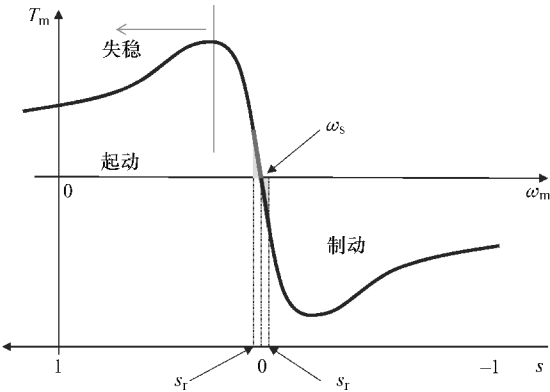


图 9.6 V/f 控制感应电动机的转矩 - 转速特性

所示。

如图 9.5 所示，由于变换器的电压是有极限的，需要设置极限保护，这就要用到速度传感器，这部分内容具体在后面进行介绍。

在使用 PMSM 时，由于低速时的不稳定性^[4]， V/f 的控制方法不能直接运用。若要使用 V/f 控制法，需要使用结合永久磁铁的笼型转子^[5]，或者实时测量转子机械速度、同步定子电流和转子的位置，如图 9.7

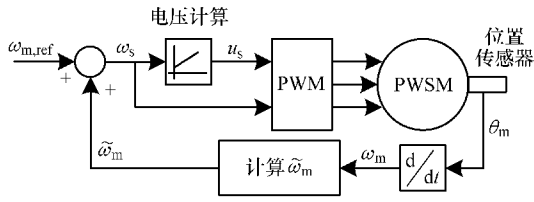


图 9.7 带测速的 PMSM 稳定回路

所示。由于加设了位置传感器，采用这种方法不仅增加了控制的成本还降低了系统的可靠性。

参考文献 [3] 中提出了一种不使用传感器的稳定 V/f 控制方法。这种方法使用功率扰动代替速度扰动控制电动机平稳运行。功率大小可以通过计算测量到的电动机相电流得到。这种方法很好地反映了额定速度下额定转矩的阶跃变化，但同样在低速状态下无法正常使用。

9.1.1.1 水泵、风机和 HVAC 应用

水泵、风机和 HVAC 的可持续应用着眼于节约能耗。电动机内部 63% 的能量提供给了压缩机、换气机和泵机^[1]。这些设施的能量消耗大约占总消耗的 75%，其中包括投资和维修。欧盟委员会“电动机挑战计划”宣称通过使用 VSD 可以节约用于水泵、风机和 HVAC 的 30% 的能量。

一些典型部件是用来应对最坏状况下的负荷条件（最大流量）的，而这类情况的出现往往只占全时程的 5%。流量的控制则由输出控制阀掌握。然而，从图 9.8 中可以看出，采用 VSD 能够有效地降低能耗，泵机和风机的负荷转矩与转速成二次方关系。

由式 (9.1) 可得 $T_{em} \propto V^2/f^2$ ，负荷特性是 $T_{pump} \propto f^2$ 。显然在恒速工作状态下，两转矩相等。那么 VSD 则必须按照 $V \propto f^2$ 的法则而非 $V \propto f$ 来设置。

如图 9.9 所示，在阀门控制的应用当中，所需的流量是通过增大水泵或风机的头 (head) (工作点 O_1) 得到的。这是因为水泵或风机的特性不能改变（在固定的转速下运行），此时流速只能通过使用阀门创造虚头（或损耗）来改变。 O_1 点以下的虚线区域就是传给流体的能量（头 × 流速）。

使用了 VSD 以后，水泵和风扇的速度可以在 $n_1 \sim n_2$ 的范围内进行调节（工作点 O_2 ），最终只产出所需要的流量。此时传递给流体的能量即所需能量，因此提高了 VSD - 电机 - 水泵（或风机）- 管道系统的整体效率。

图 9.9 也表明流速越低，节能效果越好。

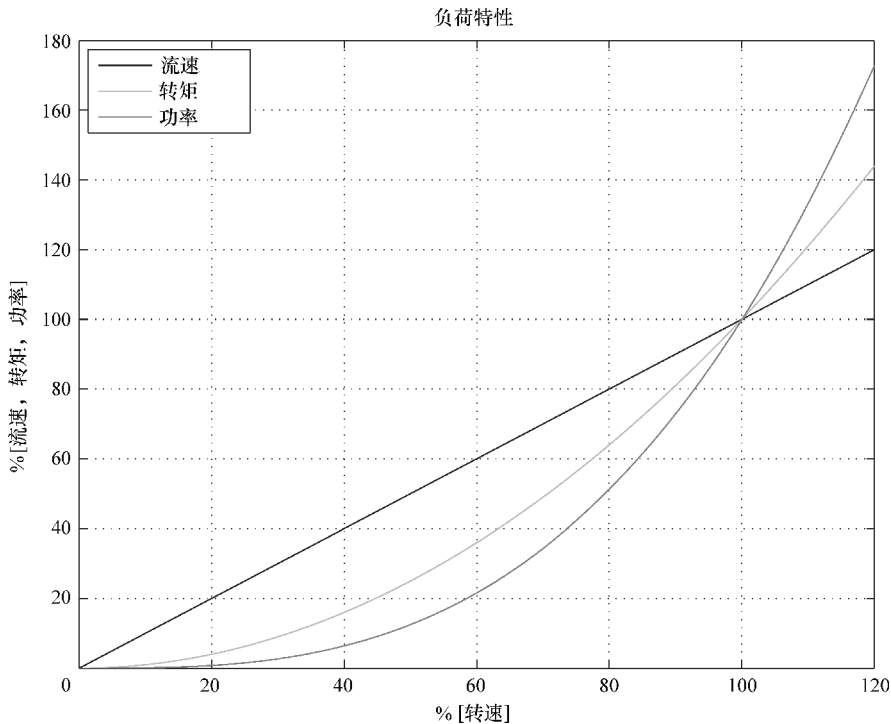


图 9.8 风机或泵送系统的负荷特性（必须注意的是，当转速为额定值的 60% 时，转矩为额定转矩的 35%，而功率只有额定值的 20%）

9.1.2 矢量控制

矢量控制是将电动机的电气方程进行分解从而获得直流电动机中产生转矩的定子电流和转子磁通之间的关系。这个分解基于帕克转换（Park transformation）^[6]，最终分解出磁通产生的电流与转矩产生的电流。这就如同在一个单换向器电动机中，磁通电流对应励磁电流，而转矩产生的电流对应电枢电流。

矢量控制原理能同时应用于同步电动机和异步电动机。其主要区别是在永磁同步电动机中，转子的磁通是由永久磁铁产生的，因为没有必要再从定子电流中创造转子磁通，所以产生的转子磁通较之永磁同步电动机是可以忽略不计的。

由帕克转换可以得到如下转换方程：

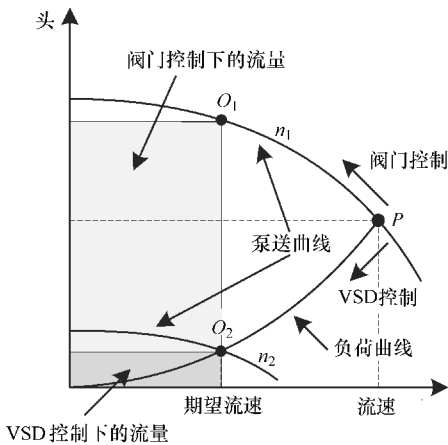


图 9.9 阀门控制和 VSD 控制下的风机系统泵送模型

的转子磁通较之永磁同步电动机是可以忽略不计的。

$$\begin{aligned}
u_{qs} &= R_s i_{qs} + p\lambda_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} \\
u_{ds} &= R_s i_{ds} + p\lambda_{ds} - \omega_s \lambda_{qs} \\
u_{qr} &= 0 = R_r i_{qr} + p\lambda_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr} \\
u_{dr} &= 0 = R_r i_{dr} + p\lambda_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr} \\
\lambda_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\
\lambda_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\
\lambda_{qr} &= L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \\
\lambda_{dr} &= L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\
T_{em} &= \frac{3PL_m}{22L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds})
\end{aligned} \tag{9.6}$$

式中 u_{qs} 和 u_{ds} ——定子电压；
 R_s 和 R_r ——定子和转子电阻；
 i_{qs} 和 i_{ds} ——定子电流；
 p ——微分算子；
 λ_{qs} 和 λ_{ds} ——定子磁通损耗；
 ω_s ——定子电压和电流的频率；
 u_{qr} 和 u_{dr} ——转子电压，因为假设转子绕组短路，所以赋值为 0；
 i_{qr} 和 i_{dr} ——转子电流；
 λ_{qr} 和 λ_{dr} ——转子磁通损耗；
 ω_r ——转子电压和电流的频率；
 L_s 、 L_m 和 L_r ——定子、磁化和转子电感；
 T_{em} ——电磁产生转矩；
 P ——极数。

矢量控制的优点在于通过合适地选取帕克转换公式中的角度，可以简化式 (9.6)。选择由转子 d 轴磁通所定向的角度，然后控制转子 q 轴磁通，使其等于 0 ($\lambda_{1qr} = 0$)，那么转矩方程变为

$$T_{em} = \frac{3pL_m}{22L_r} \lambda_{dr} i_{qs} \tag{9.7}$$

该式与直流电动机的转矩方程相似。并且，如果同时 $p\lambda_{dr} = 0$ ，那么 λ_{dr} 和 i_{qs} 正交，从而产生最大转矩^[7]。

然而，为了维持这些条件，需要使用一种精确、细致的控制方法来控制电动机。

在永磁同步电动机中，转子磁通 λ_{dr} 是由永久磁铁产生的，是一个固定值。为了控制转矩，只能控制 i_{qs} 。在感应电动机中，磁通 λ_{dr} 必须通过定子电流产生。由式 (9.5) 的转子电压方程可知，转子磁通 λ_{dr} 和定子电流 i_{ds} 之间的关系可以表

示为

$$\lambda_{dr} = i_{ds} \frac{L_m}{\tau_r p + 1} \tag{9.8}$$

式中 $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ ——转子时间常数。

由式 (9.7) 可以发现，两者存在一阶关系，并且定子电流 i_{ds} 很容易测量得到，而转子磁通 λ_{dr} 可以通过定子电流 i_{ds} 算出。

图 9.10 显示了转矩和磁通可以分别被控制。另外，在这种控制策略中，对电流的限制可以直接在控制方案中实施。它允许电动机和变换器存在固有保护。这道限制可根据电动机工作环境的不同进行调整（比如温度），这样便使电动机可用于不同领域中。

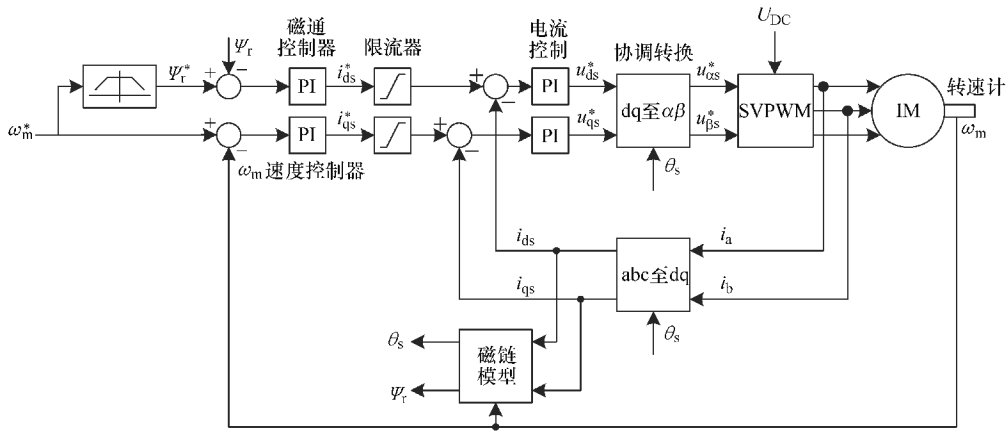


图 9.10 矢量控制方法的结构框图

9.1.3 DTC

直接转矩控制（DTC）是由高桥（Takahashi）教授和野口（Noguchi）教授于 1986 年提出的^[8]。与此同时，Depenbrock 教授提出了直接自控制（DSC）^[9]，该方法和 DTC 相似。也正是 Depenbrock 教授于 1995 年研制出首个具有实际商用价值的 VSD，该 VSD 由 ABB 公司提出并建立在 DTC 的基础之上。

在 DTC 中，通过查表的方式选择逆变器电压空间矢量，从而同时控制转矩和定子磁通。

与矢量控制相比，DTC 的主要优势在于它非常简单。正是这种简单性使 DTC 可以控制一些没有速度传感器的系统。

DTC 的主要缺点是由滞后调节器引起的高转矩脉动以及可变开关频率。

DTC 是建立在定子磁链矢量可由施加于定子上的电压求得的基础上的，公式如下：

$$\Psi_{\text{dqs}} = \int (u_{\text{dqs}} - R_{\text{s}} i_{\text{dqs}}) dt \tag{9.9}$$

另外，如果已知这个定子磁链矢量和该定子电流矢量，产生的转矩便可通过计算得到：

$$T_{\text{em}} = -\text{Im}(\Psi_{\text{dqs}} \dot{i}_{\text{dqs}}) = -\|\Psi_{\text{dqs}}\| \|i_{\text{dqs}}\| \text{Im}(e^{j(\theta_s - \theta_1)}) \tag{9.10}$$

式中 θ_s ——定子磁链矢量的角度；

θ_1 ——定子电流矢量的角度。

假设定子磁链矢量是已知的，那么 DTC 确定哪些电压矢量必须应用于电动机取决于磁通量以及转矩是否增加。

如图 9.11 所示，对于一个给定的定子磁链矢量，每个 8 定子电压矢量都确定一个新的定子磁链矢量。

在图 9.11 所示的时刻，为了将定子磁链矢量维持在磁通量滞后带中，需要减小磁通量。此时只有定子电压矢量 $\underline{V}_3$ 和 $\underline{V}_4$ 是可用的。

究竟选择 $\underline{V}_3$ 还是 $\underline{V}_4$ 取决于希望转矩增加还是减少。为了做出这个选择，需要插入一个迟滞比较器。在图 9.11 所呈现的例子中， $\underline{V}_3$ 使转矩增加，而 $\underline{V}_4$ 使转矩降低。当希望转矩为 0 时，便可使用 $\underline{V}_0$ 和 $\underline{V}_7$ 这两个零矢量。

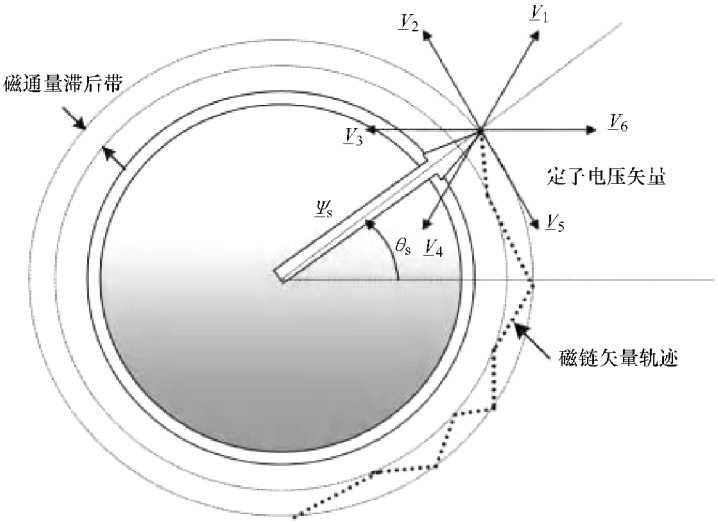


图 9.11 DTC 的磁通路

采用上述方法，可以将不同时刻电压矢量对定子产生影响的情况进行总结，并整理成一张开关状态表^[8]。

如图 9.12 所示，DTC 是一种无转矩控制器技术。速度闭环系统需要一个速度传感器，但在转矩控制中，无速度矢量控制可与 DTC 一同使用。

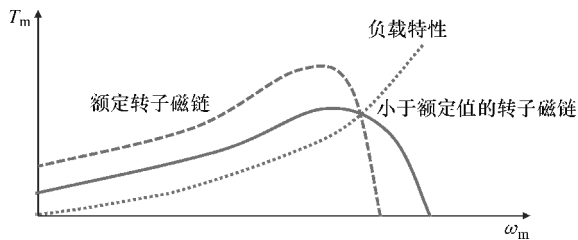


图 9.14 转子在额定磁链和小于额定值磁链时的转矩 - 转速特性

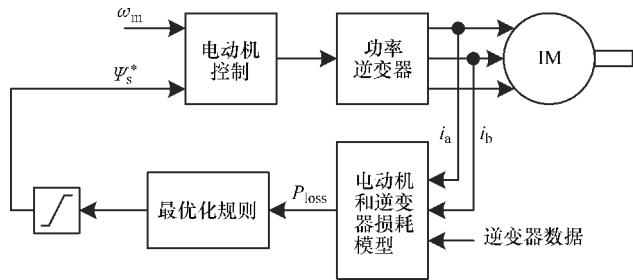


图 9.15 最优化过程的结构框图

根据效率去计算最优通量水平是一项复杂的任务，需要考虑系统包含的所有损耗。在实际的系统中，计算变速驱动器中的所有损耗是不可能实现的，因为有些损耗是无法预测的，同时也不是所有损耗都有测量的必要，增加额外的损耗测量设备尽管能更好地测量系统的损耗，但也会提高系统成本，甚至降低控制策略和 VSD 的可靠性。

9.2.1 变换器的损耗

变换器的损耗来源于开关元件的非理想特性，可以分为传导损耗和开关损耗。传导损耗是由正在工作的存在阻抗的电力设备（晶体管和二极管）引起的。这些损耗取决于许多易受温差和电压等强烈影响的参数，比如循环电流、调制指数、变换器的功率因数以及晶体管参数等。上述这些参量都是很难估量的，通常情况下都是使用数据手册中的参数值。

开关损耗主要源于动力设备的非理想转换。同时，这些损耗还取决于电流、电压发热温度和设备参数等变量，并且这些损耗还与频率成线性关系。

为了降低开关损耗，必须采用合适的调制技术。正如后面将描述的一样，选择合适的调制技术可以减少开关切换的次数，降低开关损耗，同时不会影响到驱动器的性能。

在 DTC 情况下，预测变换器的损耗是一项艰巨的任务，这是因为传导的间隔和开关的频率是不断变化的。

9.2.2 电动机损耗

电动机损耗可分为铜损和铁损。同时，机械损耗（如摩擦和游隙）比较容易统计。

铜损来源于定子和转子绕组（异步电动机）中的焦耳效应。铜损取决于电流和绕组电阻，而这两者又取决于由趋肤效应所产生的温度与频率变化。

电动机的核心损耗包括涡电流和磁滞现象，两者均由铁芯中的磁通量变化而引起。

9.2.3 能量最优控制策略

许多文献中都讲述了提高能源效率的最优控制策略^[7]。这里将其中一些最重要的方法归类简述如下：简单状态控制、基于模型的优化法以及搜索控制法。所有这些方法都可用于 V/f 控制、矢量控制和 DTC。

最简单的方法就叫做简单状态控制法。这个方法的目的就是在运行时维持一个恒定的功率因数。一个闭环系统只需测量 $\cos\varphi$ 并调整磁通量就可以保持功率因数恒定。

基于模型的优化法需要建立在电动机模型上。模型的损耗可以通过解析或数据堆叠的方法求得。在这两种情况下，都只要测量出电流，模型就可以求解，从而得到最优操作点。

依靠数据求解模型允许包含非线性的情况，但计算需要花费很多时间。通过分析法解决则可以直接得出最优磁通量。

搜索控制法需要一个精确的速度，其目的是为了保持电动机的输出功率恒定。通过修改磁通量找到最小输入功率，并维持输出功率不变，以此作为最优操作点。

9.3 VSD 拓扑结构

VSD 是由多种元素组成的一个复杂系统。商业上可用的 VSD 采用双变换系统，甚至还存在一些能够从一个固定的频率振幅电压产生一个可变频率振幅电压的变化器拓扑作为矩阵变换器。

图 9.16 所示为 VSD 的结构框图。当工作在驱动模式下时，来自电网的电能转化为机械能。

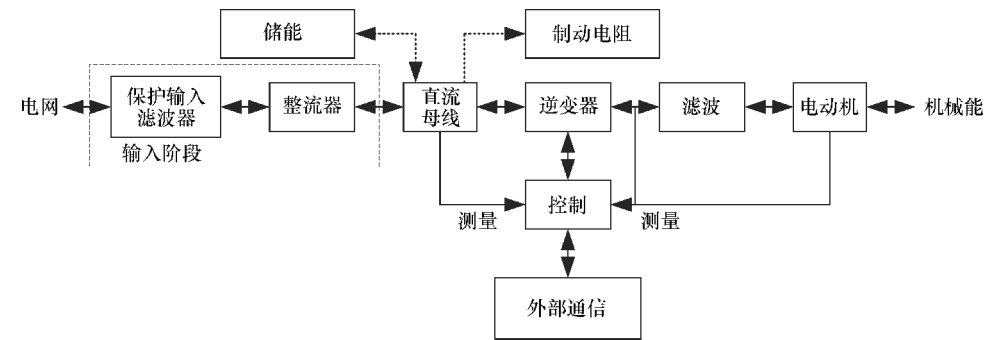


图 9.16 应用 VSD 的实现框图

通常电动机能在再生制动的情况下工作，但无法在整流阶段运行，因此制动能量肯定消耗在制动电阻或更高级的组件上，还能储存于电池或超级电容器当中，以便将来使用。同样，一台整流器也能将能量从电动机内注入到电网当中。

为了保护控制目标（电流、位置/速度、直流母线电压、电网电压等），需要测量监控一些数据。所有这些测量结果通过控制设备进行分析然后产生合适的信号发送给逆变器以及其他系统从而实现 VSD 系统的各项功能。实际上在 VSD 中，外部通讯模组是必需的，它不仅仅是为了 VSD 的组态和参数设置，同时也是为了在分布式控制系统中和其他监控元素互相作用。

9.3.1 输入阶段

如图 9.16 所示，输入阶段由保护器、过滤器和整流器组成。整流器用于从交流电网中转换交流固定频率和电压幅值到逆变器所需的直流电压当中。

图 9.17 给出了将二极管整流桥作为一种便宜又简单的解决方案。它不需要控制，而且换向二极管能够提供良好的效率。

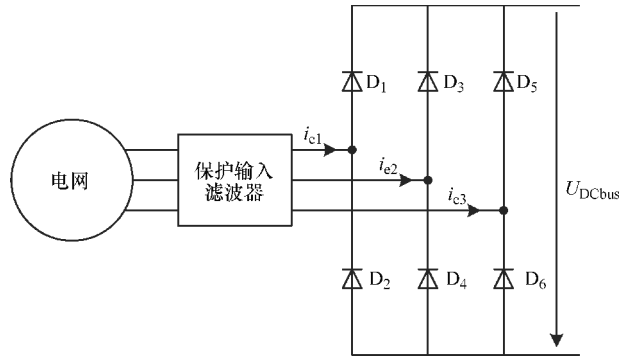


图 9.17 VSD 滤波整流模块的实现

二极管整流桥消耗了电网中具有高阶谐波含量的电流。IEC 61000^[10]中规定了这些谐波的标准，并且为了不污染电网，必须加设过滤器。同样，低阶谐波也会造成损耗。保护措施是用来防止 VSD 系统过电流、电压偏差和来自电网的脉冲电压的。图 9.17 所示的二极管整流桥不能将直流母线电压（ U_{DCbus} ）控制为一个常量，而且 U_{DC} 也仅仅取决于电网电压。如果 U_{DC} 是变量的话，不仅给逆变器带来不利，还会限制调速范围和 VSD 的执行。

一旦对能源效率（参见参考文献 [11] 和 [12]）和注入电网的谐波有了新的规定和要求，那么新的解决方案也将会应运而生。

尽管采用功率因数校正（PFC）技术可以避免低频谐波和消耗的功率因数电流对电网造成的影响、减少总电流损耗，但是实施成本很高，另外由于需要很多部件，效率也会降低。PFC 技术主要的优势在于减少了过滤器的数量，它只需要过滤高频谐波，同时还能够将 U_{DC} 维持在一个恒定的位置。

在发电机模式下，二极管整流桥和 PFC 无法将能量反馈给电网，此时能量必须消耗在制动电阻上或者储存于电池和超级电容器中。储存的能量可在将来使用，也起到了提高 VSD 系统效率的目的。

更好的方法是使用有源整流器。有源整流器可作为输入前端使用。有源整流器允许能量双向流动，发电机模式下的能量可以传回电网，提高系统效率。有源整流器的拓扑结构和逆变器的相同，能用来控制电网中消耗的正弦电流，同时还能够提供一恒定功率因数。大量的昂贵部件和微处理器里的复杂控制是造成系统高复杂性以及高成本的原因。

9.3.2 直流母线

直流母线主要是由电解电容器组成的能量缓冲区域，它为逆变器提供能量瞬变并将直流电压保持为一个常数。

当 VSD 与电网相连接时，必须执行直流母线电压预充电系统以防止冲击电流的产生。通常低能量 VSD 系统使用的是 NTC 电阻器，而对于高能量 VSD 系统，电阻器和旁路开关都是必不可少的。

直流母线中的大部分能量储存在电解电容器当中。母线 C 级取决于换流器的能量。电解电容器是损耗的来源，其原因在于它们拥有大量 ESR（因此有高损耗）而且它们并不是高温组件（100℃）。在设计直流母线时一定要非常小心，要预防高温而减少母线寿命。

电解电容器所蕴含的大量的 ESL 可能会导致晶体管 dV/dt 值过大，使得晶体管因过电压而损坏。为了防止晶体管内部的电压冲击，在电路连接时 MKP 电压器应接在晶体管附近。

在再生模式下，转子轴上的机械能通过逆变器传送到直流母线上，从而增大电容器的电压。如果输入端是二极管整流桥或 PFC，能量不但无法回溯到电网中，反而会消耗在制动电阻上。图 9.18 显示了直流母线电容器、制动斩波器和电阻器。

该制动电阻器的规格取决于预测制动能量的消耗情况。为了增加效率，该电阻器并不总是和直流母线相连，会有一个控制系统来监测直流母线上的电压。当电压达到预先设定的值时，斩波器才开始消耗电阻器中多余的能量。

然而，这并不是是一种有效的使用电能的方式。最近，在一些再生制动的常见应用中，（如升降机），带有超级电容器的能量储存形式的应用越来越广泛。使用超级电容器来储存制动能量不仅是一种更有效的使用能量的方式，而且减少了整流阶段的能量。有储存系统的输入整流器必须供应的只有平均功率和系统损耗，而不必供应峰值功率。

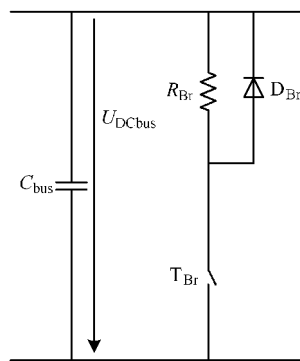


图 9.18 直流母线中的电容器、
制动斩波器和电阻器

它能够减少系统、输入滤波器、保护和布线的成本。

9.3.3 逆变器

通常，当谈起 VSD 时，我们就会想到它是电力电子学科中负责传递能量给电动机的设备^[14]。高电压（400 ~ 800V）、高功率（4kW ~ 1MW）领域的电力电子变换器主要用于转换应用模式的功率半导体。这奠定了所有应用电力电子学科的基本原则和操作模式。

用于 VSD^[15]的逆变器有两种类型。传递可变振幅和频率电压的类型叫做电压源逆变器（VSI）；传递可变振幅和频率电流的类型叫做电流源逆变器（CSI）。在中低功率应用中，VSI 是最常用的逆变器，因为它简单可靠；在高功率应用中，两种逆变器都享有一定市场份额，而 VSI 的市场份额正在逐渐增加。

整流器的输出特性取决于整流器的结构、电子设备的型号和控制的方式。除了连接电路外，它们加入了输出电压的成分并且在所提供的负荷上考虑电源变换器的影响。

到目前为止，硅静态开关是 VSD 逆变器中^[16]最常用的开关。绝缘栅双极型晶体管（IGBT）或者金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）是功率半导体开关中最常见的类型，IGBT 应用于中高功率市场，MOSFET 则应用于低功率市场。由于这些开关是逆变器损耗的主要来源（传导和换向损耗），人们正努力于用更加节约的风能的基础设备来替代硅基光电设备。目前研究的热门是使用了碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）的设备^[17,18]。

功率变换器的拓扑结构在对能源效率的利用中扮演着很重要的角色。传播最广的逆变器拓扑是两级逆变器，但对于高效率和高电压驱动，多级拓扑也被列入考虑。图 9.19 展示了三级和多级 NPC 拓扑。

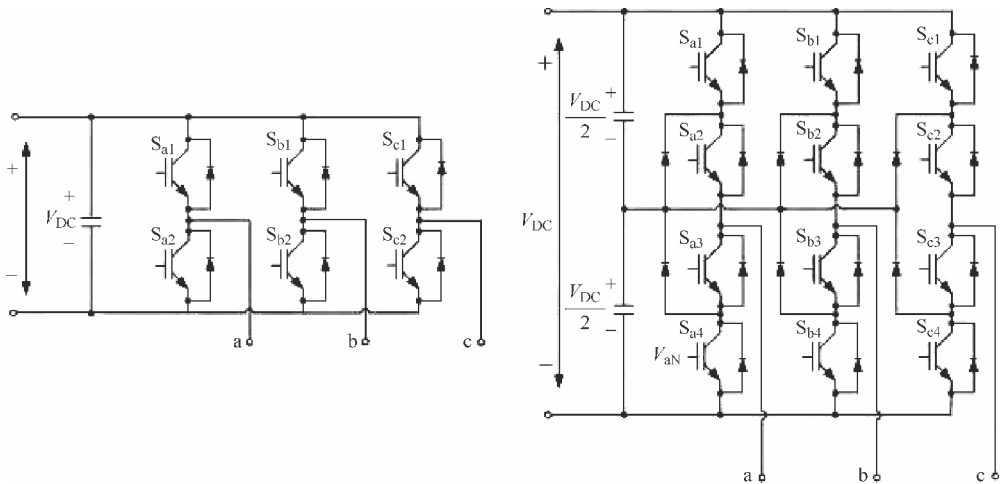


图 9.19 单相两电平和三相三电平逆变器的示意电路

最后，开关打开和关闭的方式也就是使用的调制技术，同样会对驱动系统产生重要影响，主要表现在：由于换向影响了逆变器自身的损耗、谐波电流导致电动机损耗以及电压的降低导致磁场的削弱。

9.4 功率半导体的新趋势

电力电子技术使用半导体来控制电源和负荷间的能量流动。半导体材料种类不同，最常用的是硅基半导体^[19]，SiC 和 GaN 等新型材料也开始用作半导体材料。

电力电子学半导体仅使用在系统饱和和状态，在打开和关闭阶段使用，而不在线性操作区域。图 9.20 给出了半导体晶体管的开关过程，图中损耗有两种主要来源：传导损耗和开关损耗。

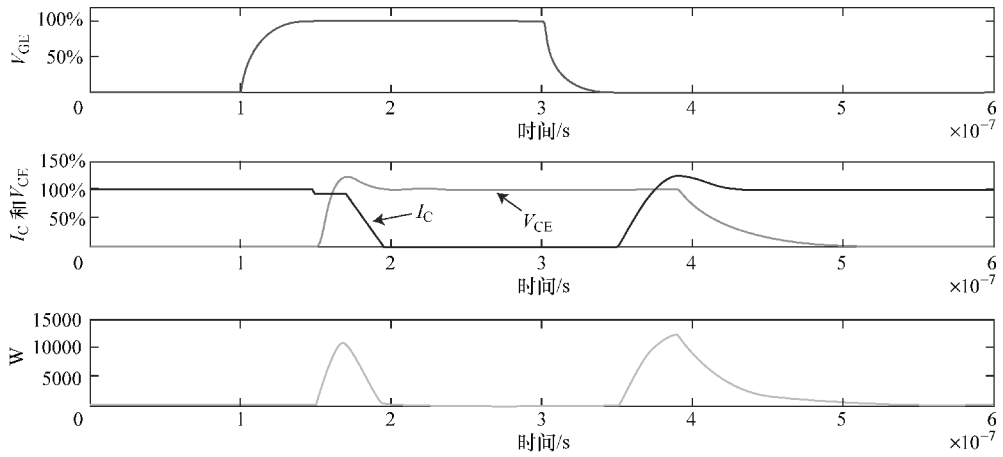


图 9.20 IGBT 工作过程（开/关特性）

整流器在高开关频率下的操作会导致被动组件尺寸的减少和开关损耗费用的增加。然而宽能带隙（WBG，例如 SiC 和 GaN）电力设备有潜力在高开关频率下进行操作并且不会有显著的损耗，原因是它们的开关速度非常快，并且拥有与硅设备相似的能在高温下工作的能力^[20]。表 9.1 列举了不同材料之间性能上的差异。

表 9.1 Si、SiC 和 GaN 材料的不同性质^[21]

性质	Si	4H - SiC	GaN
带隙 E_g /eV	1.1	3.26	3.45
介电常数 ϵ_r	11.9	10.1	9
击穿电场/(kV/cm)	300	2200	2000
热导率/(W/cmK)	1.5	4.9	1.3

9.4.1 调制技术

逆变器负责从直流总线中将直流电压变换成可变振幅和频率的交流电压。直流

电到交流电的变换可以通过不同的技术来实现，称为调制技术。

一般来说，所有的调制技术都是通过在高频率下打开和关闭逆变器开关来实现的，在这种情况下，逆变器输出电压的平均值等于参考电压。与开关在关闭状态下相比，开关开启状态的时间越长平均输出电压就越高。

现有的这些调制技术都有各自的优势和不足。因此，针对不同的产品应当选择一种最适合产品应用需求的调制技术。下面简要描述一下最主要的几类调制技术，介绍主要针对技术之间的不同之处展开，这是为了便于终端用户能够在调制技术之间进行清晰的选择。

根据恒定的开关频率，不同的调制技术可以归纳为两大类：

1) 第一类，呈现出恒定的切换频率，常见的有载波 PWM (CBPWM) 法。图 9.21 所示是 CBPWM 的一个实例，由图中可以看出该调制技术主要的标志和特点。此类型的调制技术中，电流频谱呈现为谐波的形式，其频率等于开关频率或开关频率的倍数^[22]，使其能够简单地过滤谐波成分。切换频率越高，电流谐波的序列越高。考虑到在电动机中，电流谐波意味着转矩振动，在应用中机械共振非常重要，这种调制技术由于拥有使转矩频率远离共振的能力而成为首选。

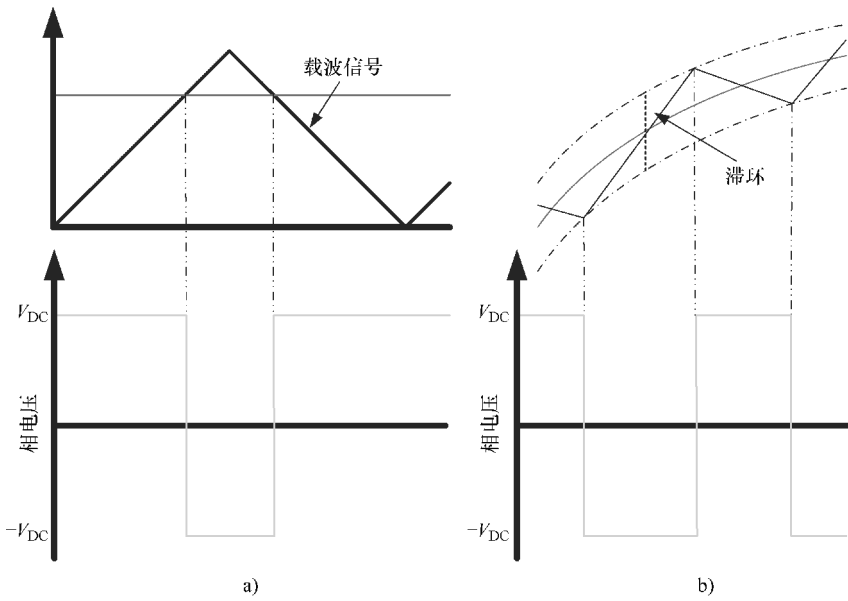


图 9.21 载波 CBPWM 和滞环调制示意图

a) CBPWM b) 滞环调制

2) 第二类，呈现出可变的切换频率，常见的有滞环调制法（以硬件方式实现）或无差拍控制法（用软件方式实现）。与前一类相比，它们在闭环带宽方面表现得更为优越，但电流频谱就不如前者了。

除了提到的差异外，调制技术在其他一些重要方面也有所不同，下面讨论的就

是最重要的区别:

1) 调制指数 (MI): 在某种意义上, MI 是使用直流总线电压的调制技术的一个品质因数。被两种不同调制技术控制的一个逆变器, 每种调制技术都有自己的 MI, 这个逆变器能从同一根直流总线上获得不同的输出电压。拥有更好 MI 指数的调制方式, 能够获得最大的输出电压。从能量效率来说, 调制方式对实际转速接近于额定转速的感应电动机的效率有很大的影响。在这些情况下, 逆变器的最大输出电压往往在电动机的额定电压之下, 当电动机的电压减小时则会产生额外的损耗。

2) 换向损耗: 每当逆变器的开关打开或关闭时, 都会有一部分能量的损耗。相比于使用更高的换向技术, 一些调制技术优化了换向序列, 以获得了同样的电压畸变, 这些调制技术也能够减少换向损耗和提高效率。

在实际应用中, 选择一种调制技术其实就是在这些优缺点之间相互平衡。下面, 以时间为序, 对每一种主要的调制技术进行简要介绍。

9.4.2 不同调制方式的回顾

9.4.2.1 方波调制

方波调制操作简单, 是最早使用的调制方法 (如今应用更多的是六步法调制)。在所有的调制技术里, 这种调制方式能获取最大的基础输出电压, 但同时会产生最大的电流谐波失真。

由于它的高电流 THD (总谐波失真), 如今这种调制方式已经很少被使用了, 而且它的使用仅限于那些将感应电动机的速度控制在最大转度和最大转矩的区域, 这使得逆变器不得不尽可能地传递最大电压。在这种情况下, 电流谐波由于相电动机的有效阻抗的存在而达到最小, 有效阻抗也会线性增加电压频率, 同时速率会达到最大值。

然而六步法调制技术中, 计算最大输出电压是非常重要的, 因为调制方式的调制指数被定义为调制方式的最大电压与六步法的最大电压之比^[23]。很显然, 根据定义, 六步法调制方式的 MI 就是其中之一。

六步法调制由在参考输出电压频率下打开或关闭逆变器的每个分支所组成。在图 9.22 中给出了涉及逆变器的虚拟中性点的 3 个分支电压。考虑到平衡负荷 (通常是三相感应电动机中的情况), 它显示了在负荷中性点与逆变器虚拟中性点之间的电压^[22]。

在图 9.23 中给出了相间电压以及相与中性点间的电压。在相间电压中可以观察到有准方波形的存在, 这种调制方式因此得名; 在相与中性点间的波形图中也能观察到“六步”的存在, 这也是这种调制方式名称的由来。由图 9.23 可以看出, 可以使用傅里叶级数计算相间电压 (见表 9.3)。

9.4.2.2 SPWM

如图 9.24 所示, 正弦载波脉冲宽度调节 (SPWM) 是应用最为广泛的调制技术^[24]。它于 1964 年由 Schönung 首先提出, 控制中包含调制信号 (在此为正弦控

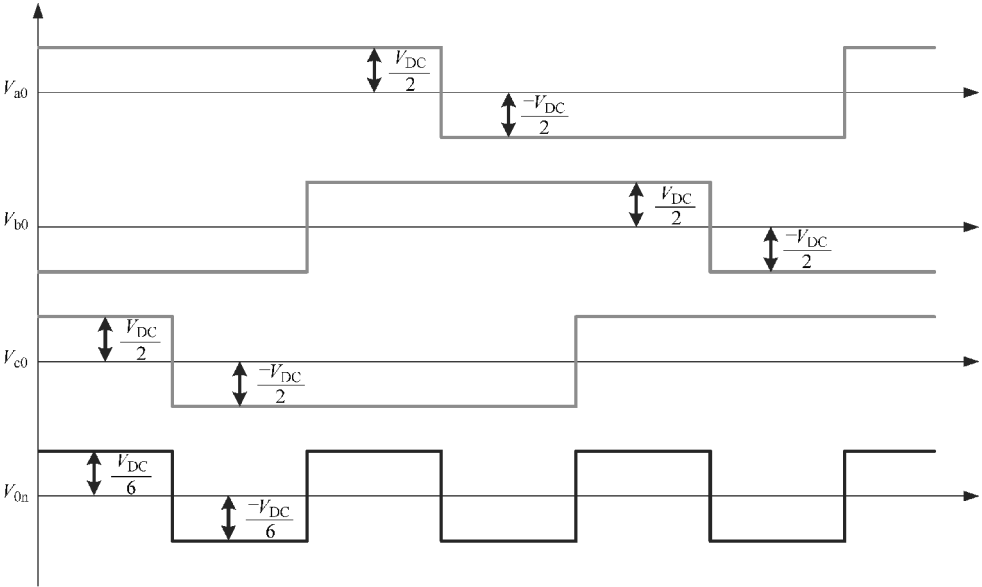


图 9.22 六步法调制中相对于直流母线虚拟中性点的相电压和逆变器的电压中性点偏移

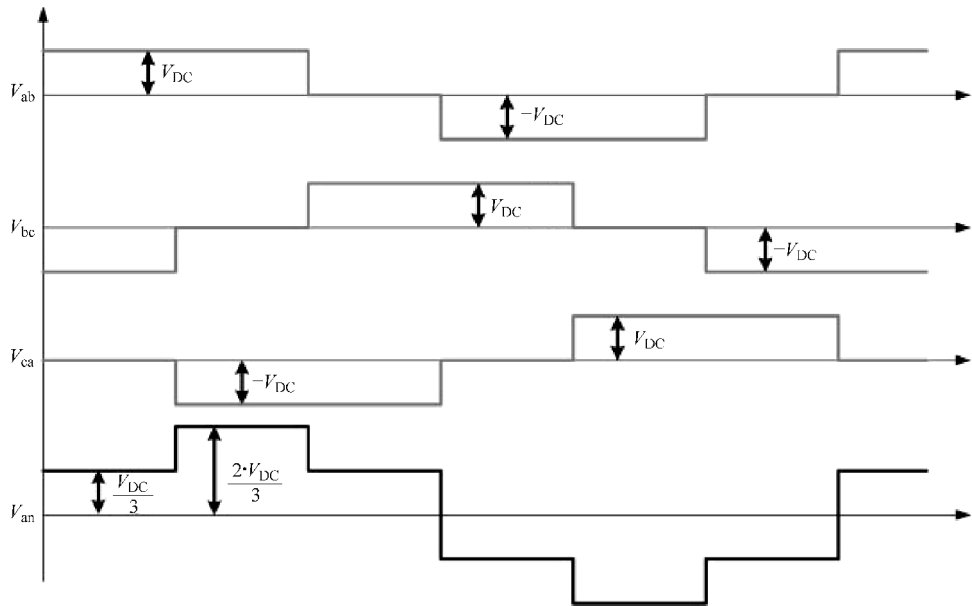


图 9.23 六步法调制中的线电压和相电压

制信号)与载波信号(通常为三角信号)的比较。当调制信号大于载波信号时,逆变器支路的上层开关打开;当调制信号小于载波信号时,上层开关关闭,下层开关打开^[15]。

这种调制技术已经在单相电压下实现了，并且也很容易推广到三相电压的应用中。这本身没什么价值，但是由于 PWM 输出，使这种调制技术可以很容易地以数字方式应用，因为 PWM 可以直接用于微型控制器或用于数字电动机控制的数字信号处理器（DSP）。

PWM 调制的最大输出电压见表 9.3，它显示了最大输出电压、最大 MI、最大输出电压和三相输入电压的比例，假设一个三相二极管整流器超前于逆变器，并且直流母线在输入三相电压（当直流连接电容器趋向于无穷时为理想值）的峰值电压下充电。如果三相感应电动机直接和直流母线相连接并由 SPMW 控制的逆变器供能，这个 0.86 的值意味着这个电动机不能工作在这个额定速度下，如果工作在低压条件下，最终会增加电动机的损耗并降低电动机的效率。

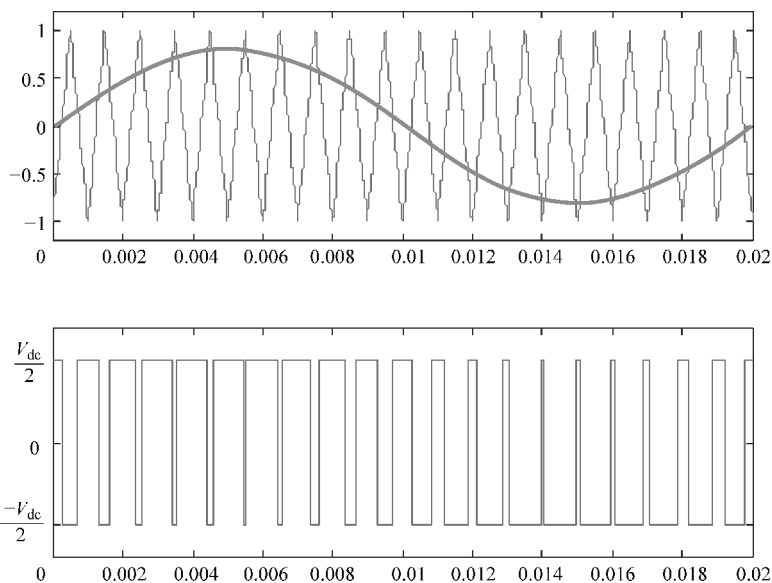


图 9.24 SPWM 技术（上图是载波信号和被调信号的波形，下图是逆变器单相中点电压波形）

9.4.2.3 THIPWM

1997 年，Buja 和 Indri 提出了三次谐波注入的 PWM（THIPWM）法用来克服 SPWM 法的缺点^[25]，如图 9.25 所示。这个调制技术为每一个相关的三相电压输入足够的三次谐波，允许将最大基础输出电压增大 $\sqrt{3}/2$ ，这比 SPWM 要高出大约 15.47%。

THIPWM 已经成了广泛的研究目标，并且不同的作者给出了不同环境下适合的三次谐波波形。一些人提出了 $1/6$ 最大峰值和其他峰值的正弦调制信号^[24]，另一些人则又提出了不连续的零序分量而不仅仅只是正弦信号^[26]。

9.4.2.4 SVPWM

随着采用峰值策略控制感应电动机转矩和速度方法的普及，基于载波的调控技

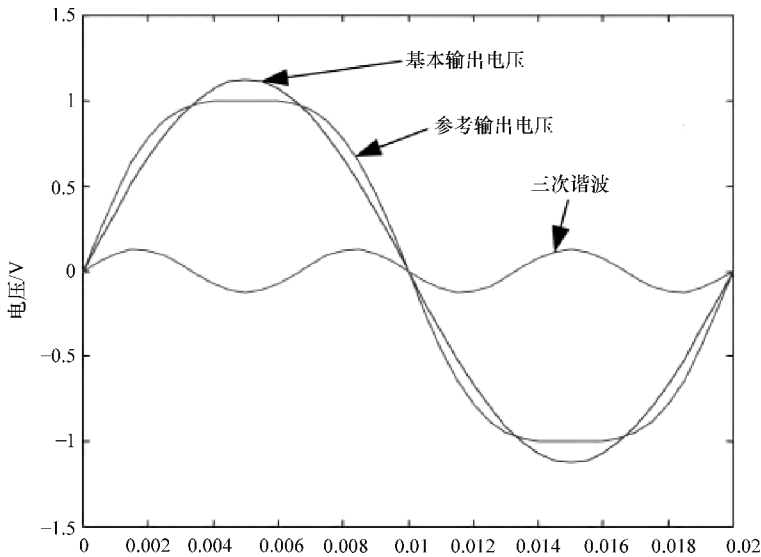


图 9.25 THIPWM (采用三次谐波注入方式时的基本输出电压、参考输出电压和三次谐波波形)

术不再适用于逆变器的控制。取而代之的是一种复杂的电压矢量控制方法 – 空间矢量 PWM (SVPWM)。

这个方法用一种很自然的方式将离散的 8 个独立矢量融合到算法里。空间矢量的状态不同，可以强加三相逆变器的效果^[27]。通常来自于这 8 个状态的电压体现在峰值变量中。诸如感应电动机和同步电动机等负荷设备的高耦合特性，使逆变器更倾向于使用人工变量而不是实际变量^[22]。可以从实际变量中获得 Clarke 变量的数学表达式如下：

$$\begin{pmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_r \\ v_s \\ v_t \end{pmatrix} \tag{9.11}$$

图 9.26 中简单地体现了 Clarke 变形原理。在笛卡尔坐标系中，对称三相电压的一个变量 (v_r, v_s, v_t)，所有的点都位于单极平面中，即 $v_r + v_s + v_t = 0$ 。现在假设存在一个新的正交坐标，有两个轴位于单极平面 ($\alpha - \beta$)，第 3 个轴与该单极平面 (0) 垂直。

SVPWM 调制包括了整合相关电压。通过集合逆变器在 8 个矢量上的任意可能的状态并通过 Clarke 变量 $\underline{V} = (V_\alpha, V_\beta)$ 表示，如图 9.27 和图 9.28 所示。表 9.2 列举了一个两级逆变器的 8 个矢量可能的状态。

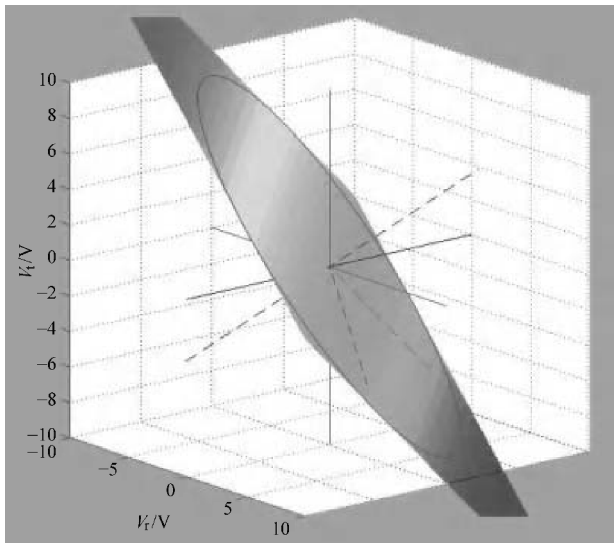


图 9.26 Park 变形的说明 (图中包含由三相矢量组成的笛卡尔坐标系和单极平面。
在单极平面包含了所有满足 $v_r + v_s + v_t = 0$ 的点; α 轴和 β 轴正位于此平面)

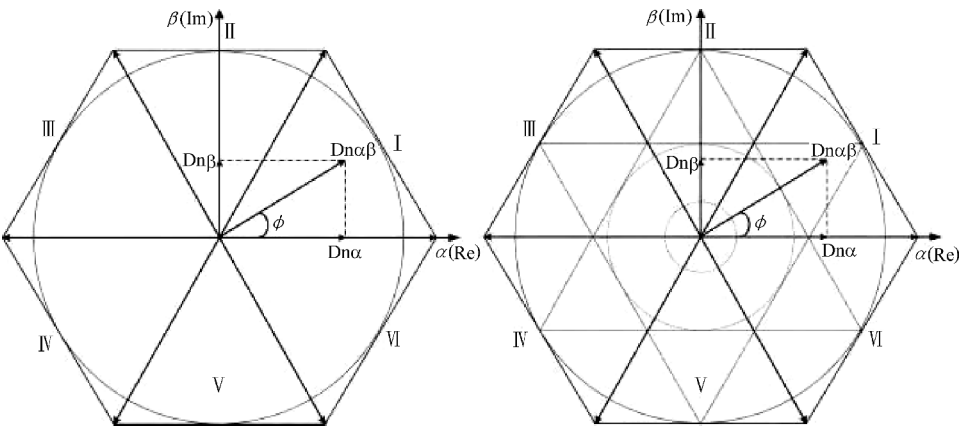


图 9.27 两级 SVPWM 和三级 SVPWM 矢量图

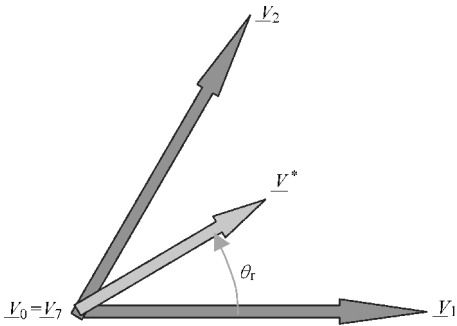


图 9.28 由两个相邻矢量和两个单极矢量合成一个基准电压

表 9.2 三相逆变器的 8 种不同的状态以及这些状态对应的矢量
(第 5 列表示的是相电压, 最后一列表示的是 $\alpha - \beta - 0$ 相电压)

	S_1	S_2	S_3	$\underline{V}_{rst} = (V_r, V_s, V_t)$	$\underline{V}_{park} = (V_\alpha, V_\beta, V_0)$
$\underline{V}_0$	-1	-1	-1	$\left(\frac{-V_{DC}}{2}, \frac{-V_{DC}}{2}, \frac{-V_{DC}}{2}\right)$	$\left(0, 0, \frac{-\sqrt{3}V_{DC}}{2}\right)$
$\underline{V}_1$	1	-1	-1	$\left(\frac{V_{DC}}{2}, \frac{-V_{DC}}{2}, \frac{-V_{DC}}{2}\right)$	$\left(\frac{\sqrt{2}V_{DC}}{\sqrt{3}}, 0, \frac{-\sqrt{3}V_{DC}}{6}\right)$
$\underline{V}_2$	1	1	-1	$\left(\frac{V_{DC}}{2}, \frac{V_{DC}}{2}, \frac{-V_{DC}}{2}\right)$	$\left(\frac{V_{DC}}{\sqrt{6}}, \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}, \frac{\sqrt{3}V_{DC}}{6}\right)$
$\underline{V}_3$	-1	1	-1	$\left(\frac{-V_{DC}}{2}, \frac{V_{DC}}{2}, \frac{-V_{DC}}{2}\right)$	$\left(\frac{-V_{DC}}{\sqrt{6}}, \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}}, \frac{-\sqrt{3}V_{DC}}{6}\right)$
$\underline{V}_4$	-1	1	1	$\left(\frac{-V_{DC}}{2}, \frac{V_{DC}}{2}, \frac{V_{DC}}{2}\right)$	$\left(\frac{-\sqrt{2}V_{DC}}{\sqrt{3}}, 0, \frac{\sqrt{3}V_{DC}}{6}\right)$
$\underline{V}_5$	-1	-1	1	$\left(\frac{-V_{DC}}{2}, \frac{-V_{DC}}{2}, \frac{V_{DC}}{2}\right)$	$\left(\frac{-V_{DC}}{\sqrt{6}}, \frac{-V_{DC}}{\sqrt{2}}, \frac{-\sqrt{3}V_{DC}}{6}\right)$
$\underline{V}_6$	1	-1	1	$\left(\frac{V_{DC}}{2}, \frac{-V_{DC}}{2}, \frac{V_{DC}}{2}\right)$	$\left(\frac{V_{DC}}{\sqrt{6}}, \frac{-V_{DC}}{\sqrt{2}}, \frac{-\sqrt{3}V_{DC}}{6}\right)$
$\underline{V}_7$	1	1	1	$\left(\frac{V_{DC}}{2}, \frac{V_{DC}}{2}, \frac{V_{DC}}{2}\right)$	$\left(0, 0, \frac{\sqrt{3}V_{DC}}{2}\right)$

表 9.3 4 种调制技术对比 [每一项参数都列在表中: 最大输出电压 (相对于直流母线上的电压)、最大调制系数以及输出电压和三相输入电压之比 (假设前面有一个三相二极管整流器, 三相输入电压的峰值电压给直流母线充电)]

调制技术	最大输出电压	$\frac{V_{\text{eff输出}}}{V_{\text{eff输入}}}$	MI
方波	$\frac{\sqrt{6}}{\pi}V_{DC} = 0.779V_{DC}$	1. 1	1
PWM	$\frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{2}}V_{DC} = 0.612V_{DC}$	0. 86	0. 785
PWM 和 THIPWM	$\frac{1}{\sqrt{2}}V_{DC} = 0.707V_{DC}$	1	0. 907
SVPWM	$\frac{1}{\sqrt{2}}V_{DC} = 0.707V_{DC}$	1	0. 907

9. 4. 2. 5 多级的逆变器拓扑结构

最近, 多级的功率变换器在许多高能中压工厂的应用中受到了大量的关注。一

个多级结构的逆变器采用一系列的功率半导体开关整合来自几个直流电压级的交流终端输出电压进行功率变换,这样就会产生梯形波。和两级变换器相比,多级变换器存在明显的优势:例如降低了谐波失真、减小了负荷的电压压力、能提供更低的常规电压以及减少了电磁干扰等。通过减少过滤要求,不仅提高了变换器的效率,也提高了负荷功率。由此,用一个较低谐波的负荷电压提高了负荷效率。

多级变换器基本上用来增加变换器的额定功率。越高级的拓扑结构所能提供的输出电压的质量越高。多级变换器的概念在1975年提出,“多级”这个词最初意味着“三级”^[34],现在则用来形容所有拥有超过两级输出电压的变换器。多级拓扑结构的发展包括增加半导体开关数量以及功率变换模块的数量(如多重变换器模块)。追求更高层次电压等级的趋势是很有必要的,因为用更低的谐波失真得到更高的电压功率是非常有利的。通过增加电压等级的数量,变换器的基本输出电压可以以一个相对较低的谐波量产生,并且还会显著提升输出电压的质量,从而得到更加理想的正弦波形。

传统的两级变换器可以通过使用较高的切换频率来为低功率应用提供高质量的输出。然而,对于中、高功率的应用来说,由于高切换损耗通过切换设备得到的最大转换频率是有限的。在这种情况下,多级变换器可用来降低切换频率,并且能够生成高质量的输出波形。多级变换器较之两级变换器的优势与缺点,大致总结如下^[28,35,36]:

1) 多级变换器可以产生很低的谐波失真的输出电压。多级输出的PWM电压可以减少阻止了电压和电动机负荷压力的逆变器的开关次数。负荷上电压的降低可以减少电磁兼容性(EMC)问题。

2) 多级变换器可以产生较低的共模电压,使电动机轴承所受压力减少,这也增加了与多级电动机连接的电动机的寿命。

3) 通过产生梯形电压波,多级变换器可产生较低畸变的输入电流。较低的电流纹波,可以使直流链路中的电容滤波器的尺寸减小。

4) 多级变换器既可以在常规切换频率下工作,也可以在高速切换频率PWM下工作。在高功率应用中,较低的切换频率可以减少切换损耗,带来效率的提高。

5) 然而,为了使多级变换器有更好的应用,需要大量增加功率变换装置。半导体开关数量和栅极驱动电路的增加,会增加整个系统的成本,提高系统控制的复杂度。除此之外,还需要一定数量的由电容器提供的直流电压源。想找到一个合适的操作点来平衡这些电容器的电压也是一项艰巨的挑战。

6) 撇开这些缺点不谈,由于在高功率应用中提高多级变换器效率所产生的成本只占整个系统成本很少的一部分,因此多级变换器是一个很好的选择。除此之外,因为功率半导体和DSP价格的持续下降,多级的拓扑结构也会渐渐延伸到低功率(小于10kW)的应用中。可以工作在高速切换频率的快速功率转换设备(CMOS变换器)也可以用于低压系统中。因此,这些无功分量的值也将会显著降

低。此外，相信随着未来新型能源设备的出现，多层拓扑结构的应用范围将会进一步扩大。

多级拓扑结构的 3 种典型应用如图 9.29 所示：

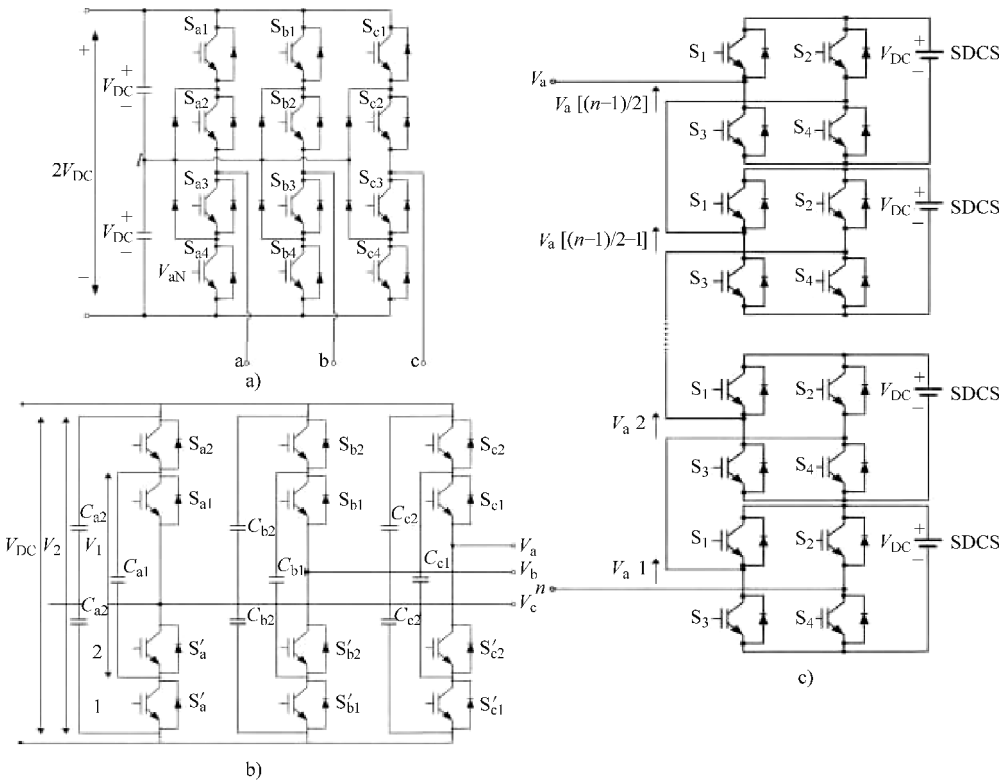


图 9.29 多级拓扑结构的 3 种不同结构

- 1) 二极管钳位（中性点钳位）变换器；
- 2) 飞跨电容（电容钳位）变换器；
- 3) 有着分散直流电源的 H 桥级联变换器。

参考文献

[1] European Commission. (February 2003) *The Motor Challenge Programme*, <http://re.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/motorchallenge/index.htm>

[2] G. R. Slemon, Electrical machines for drives, *Power Electronics and Variable Frequency Drives. Technology and Applications*, IEEE Press, 1997.

[3] Daniel Montesinos-Miracle, P. D. Chandana Perera, Samuel Galceran-Arellano and Frede Blaabjerg, Sensorless V/f control of permanent magnet synchronous motors, *Motion Control*, In-itech, 2010.

[4] R. S. Colby and W. Novotny, An efficiency-optimizing permanent-magnet synchronous motor drive, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **24**(3), 1988, pp. 462–469.

[5] Thomas M. Jahns, Variable frequency permanent magnet AC machine drives, *Power Electronics and Variable Frequency Drives*, IEEE Press, 1997.

- [6] P. Vas, *Vector Control of AC Machines*, Clarendon Press, Oxford, 1990.
- [7] Marian P. Kazmierkowski, R. Krishnan and Frede Blaabjerg, *Control in Power electronics. Selected problems*, Elsevier Science, 2002.
- [8] I. Takahashi and T. Noguchi, A new quick response and high-efficiency control strategy of an induction motor, *IEEE trans. on Industry Applications*, **IA-22**(5), 1986, pp. 820–827.
- [9] M. Depenbrock, Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, **3**(4), 1988, pp. 420–429.
- [10] *IEC 61000 Electromagnetic compatibility (EMC)*, IEC.
- [11] *IEC60034 Rotating electrical machines*, IEC.
- [12] *General Specification for Consultants, Industrial and Municipal: NEMA Premium[®] Efficiency Electric Motors (600 V or Less)*, NEMA.
- [13] Alfred Rufer and Philippe Barrade, A supercapacitor-based energy-storage system for elevators with soft commutated interface, *IEEE Trans on Industry Applications*, **38**(5), 2002, pp. 1151–1159.
- [14] Bimal K. Bose, *Power Electronics and Variable Frequency Drives*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1997.
- [15] Ned Mohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. John Wiley & Sons, USA, 2003.
- [16] Stefan Linder, *Power Semiconductors*, CRC Press, Lausanne, Switzerland, 2006.
- [17] Qingchun Zhang *et al.*, SiC power devices for microgrids, *IEEE Trans. on Power Electronics*, December 2010, pp. 2889–2896.
- [18] Alberto Guerra and Jason Zhang, GaN power devices for micro inverters, *Power Electronics Europe*, June 2010, pp. 28–31.
- [19] B. W. Williams, *Power Electronics: Devices, Drivers, Applications and Passive Components*, Metropolis Press, 1992.
- [20] J. A. Carr *et al.*, Assessing the impact of SiC MOSFETs on converter interfaces for distributed energy resources, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **24**(1), 2009, pp. 260–270.
- [21] H. Jain, S. Rajawat, and P. Agrawal, Comparison of wide band gap semiconductors for power electronics applications, *Proceedings of International Conference on Microwave – 08*, 2008, pp. 878–881.
- [22] D. Grahame Holmes and Thomas A. Lipo, *Pulse Width Modulation for Power Converters*, United States of America: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.
- [23] J. Holtz, Pulsewidth modulation – a survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, December, 1992, pp. 410–420.
- [24] Edison R. C. Da Silva, Euzeli C. Dos Santos and Cursion B. Jacobina, Pulsewidth modulation strategies: nonsinusoidal carrier-based PWM and space vector modulation techniques, *Industrial Electronics Magazine*, June 2011, pp. 37–45.
- [25] G. Buja and G. Indri, Improvement of pulse width modulation techniques, *Archiv fur Elektrotechnik*, **57**(5), 1977, pp. 281–289.
- [26] A. Trzynadlowski, Nonsinusoidal modulating functions for three-phase inverters, *IEEE Trans. Power Electronic*, **4**(3), 1989, pp. 331–339.
- [27] H. W. Van Der Broeck, H. Skudelny and G. V. Stanke, Analysis and realization of a pulsewidth modulator base on voltage space vectors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **24**(1), 1988, pp. 142–150.
- [28] W. Bin, *High Power Converters and AC drives*. John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 2006.
- [29] L. Garcia Franquelo *et al.*, The age of multilevel convertes arrives, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, **2**, 2008, pp. 28–39.
- [30] P. W. Hammond, A new approach to enhance power quality for medium voltage AC drives, *IEEE Trans. on Industry Applications*, **33**, 1997, pp. 202–208.
- [31] L. Jih-Sheng and P. Fang Zheng, Multilevel converters—A new breed of power converters, *IEEE Trans. on Industry Applications*, **32**, 1996, pp. 509–517.
- [32] J. Rodriguez, S. Bernet, W. Bin, J. O. Pontt and S. Kouro, Multilevel voltage-source converter topologies for industrial medium-voltage drives, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, **54**, 2007, pp. 2930–2945.
- [33] J. Rodriguez, L. Jih-Sheng and P. Fang Zheng, Multilevel inverters: a survey of topologies, controls and applications, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, **49**, 2002, pp. 724–738.
- [34] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, A new neutral-point clamped PWM inverter, *IEEE Trans. of Industrial Application*, **IA-17**(Sept./Oct.), 1981, pp. 518–523.

- [35] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, Academic Press.
- [36] R. Teichmann and S. Bernet, A comparison of three-level converters versus two-level converters for low voltage drives, traction and utility applications, *IEEE Trans. on Industry Applications*, **41**, 2005, pp. 855–865,

深入阅读材料

- F. Abrahamsen, Energy optimal control of induction motor drives, Ph.D. Aalborg University, Denmark, 2000.
- M. Alonso-Abella, E. Lorenzo and F. Chenlo, PV water pumping systems based on standard frequency converters, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **11**, 2003, pp. 179–191.
- Angelo Baggi, *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 2008.
- R. H. Baker and L. H. Bannister, *Electric Power Converter*, US Patent: 3 867 643, February 1975.
- Vítezslav Benda, John Gower and Duncan A. Grant, *Power Semiconductor Devices: Theory and Applications*, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 1999.
- J. Biela, M. Schweizer, S. Waffler and J. W. Kolar, SiC versus Si—Evaluation of potentials for performance improvement of inverter and DC–DC converter systems by SiC power semiconductors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**(7), July 2011, pp. 2872–2882.
- F. Blaschke, The principle of field orientation as applied to the new Transvector –closed loop control systems for rotating field machines, *Siemens Review*, 1972, pp. 162–165.
- G. H. Bode and D. G. Holmes, Load independent hysteresis current control of a three level single phase inverter with constant switching frequency, *PESC. Power Electronic Specialists Conference 2001*, 2001, pp. 14–19.
- K. Corzine and Y. Familiant, A new cascaded multilevel H-bridge drive, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **17**(1), 2002, pp. 125–131.
- F. Z. Peng and J. S. Lai, Multilevel cascade voltage-source inverter with separate DC source, US patent: 5 642 275, June 24, 1997.

第 10 章 工业热处理

Mircea Chindris 和 Andreas Sumper

在美国^[1]工业部门每年消耗的能量大约占全国的 1/3，在欧盟^[2]，每年也有 28% 的能量用于工业部门。对于欧盟，两大能源集中型工业是炼铁工业和炼钢工业，大约要消耗 20% 的工业能源，化学工业要消耗 16.3%。在欧盟全部的电能消耗中，工业占据了 41%。

热处理在绝大多数工业部门都是必须的，包括制造金属产品、塑料产品、橡胶产品、混凝土、玻璃和陶瓷。能源需求在这些行业中非常大，如图 10.1^[3] 所示。在该图中，“其他燃料”一般是指机会燃料（通常，指一些废弃物，诸如锯屑、炼厂气、石油焦等）和一些副产品，诸如木片、沼气或黑液。在许多工业行业，这是很大一部分能源的来源。

如图 10.1 所示，有很多种工业热处理的方式，包括加热、熔化、退火、干燥、蒸馏、分离、包衣等。传统的处理方法是直接使用燃料燃烧（油、气、副产品或废料）、热空气、水蒸气、水等。另一方面，过去的几十年以电能为基础的热处理系统（通常称之为电热技术）迅猛发展，通过把电能转化为热能来确保必要的加热，这些系统的实践运用基于直接、间接或混合的加热方法。

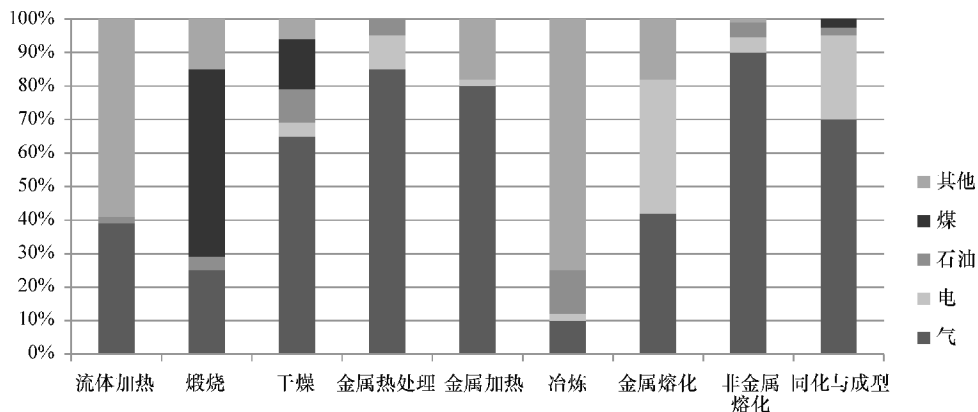


图 10.1 关键工业流程中热处理能源分布（基于参考文献 [3]）

直接加热法使热量直接在工件中产生，基于以下技术之一：使电流通过材料；在材料中制造电流（涡流）；利用电磁辐射扰动材料中的原子或分子（如微波）间接加热的方法。直接加热法通过以上 3 种方法中的一种来加热特殊的元件；后者根

据工作环境和设备型号来选择是通过热传导、对流和热辐射中的一种方法还是它们混合的方式来加热工件。混合系统是采用同一种能源的不同来源或加热方法结合起来加热工件的。

过去几十年电热技术的快速发展主要基于以下方面^[2-4]：

1) 电力电子技术的巨大进步。电力电子技术帮助工业整体性地提高工艺水平并降低成本，这一点对于热处理的电气化做出了巨大贡献。最主要的贡献在于使改变工业配电网的频率成为可能。热处理效率增加要求提供的电能具有适当的可控频率（视加热的材料而定）。

2) 精确的建模。强大的新建模程序被开发出来，借助于现代电脑强大的计算能力，可实现麦克斯韦方程在空间上每一点的计算，并准确获取关于材料参数（及其加热过程中的变化）的正确信息。

3) 制造更好的材料。举例来说新研发的热源材料和围护材料可提升工作参数（温度、压力、空气类型等）精确性，使系统更有效，甚至催生新的科技（激光处理、微波处理、等离子处理、紫外线处理等）。

4) 能源的有限性。从 20 世纪 70 年代起，能源的有限性在全世界越来越得到认可。化石能源的价格上涨，促进了基于可再生能源的新科技的发展。

5) 酸雨。通过燃烧煤来发电和基于直接燃烧燃料的热处理技术产生大量的硫化物、氧化物和氮化物，形成酸性沉积物带来严重的环境污染问题。

6) 气候变化。引起环境问题的根本原因在于不当的人类活动，即前所未有的大量燃烧油、气和煤，森林的大量砍伐，以及一些不当的农业生产手段等。自从许多国家通过《京都议定书》来减少温室气体的排放以后，工业领域对于能源的看法也发生了变化，《京都议定书》有效地将能源与经济成本挂钩，所以工业世界开始意识到未来 CO₂ 的排放将不得不加入传统能源账单。任何电力技术都必须首先证明其能源的高利用率，从而减少温室气体的排放，进而得到认可。

7) 经济挑战。随着经济的全球化，制造业开始向那些低薪酬国家迁移，能源价格的提高迫使不同的发展中国家的制造业变得更加高效，生产出更加优质的产品，并且同时具有竞争力。一种可行的解决方案是用以电力为基础的加热系统取代老式的加热技术。

8) 经济政策。现在很多公司都把注意力放在与生产力相关的问题上。尽管生产力和产品输出非常重要，但是包括热处理系统在内的可以显著降低能源消耗的技术在工业使用系统中同样成效卓越，然而这些细节总是被人们忽视。把所有这些方面都考虑进去，当然也要考虑国际上关于可持续发展的政策，一个工厂经理的职责包括使工厂的能源消耗最小化，提升产品质量最优化，维持最高的生产率和最大限度地减小操作过程中的环境污染。

现在，许多技术被应用于将电能转化为热能来加热原料的方式上，如电阻加热（直接的和间接的）、红外辐射、电磁感应、绝缘加热等。但是所有这些方法都有

各自的优点和缺点，所以应该根据不同的情况做出选择。有些情况下，以电力为基础的技术会因为其独特的优点而被选择，但在没有电力系统作为基础时，这样的技术就无法经济地使用；在其他情况下，天然气（或者其他化石燃料）和电力的相对价格就是决定性的因素。

通常，电力加热技术会与并发技术在使用化石燃料，减少工业投资和操作成本、能源成本以及初级能源需求上形成竞争。一些工业应用、电力基础技术是最普遍的使用，在其他情况下，这些仅在特定的、合适的应用中才会使用。值得一提的是，基于对寿命周期成本的分析，无论何时，效率和结果都要综合起来考虑。

考虑到所有的工业程序，电力加热的实现完成了以下预期^[4,5]：

1. 减少了生产产品所需的能源（一种更好的高效能源）

通过从原料内部产生热量来加热制造组件（就像许多电力技术一样）比通过外部对原料加热（经典加热技术的类型）需要的能源更少。另外，在许多情况下，现存的加热装置在整个产品加工过程中必须持续加热，这也增加了燃料的消耗。

2. 减少了温室气体的排放量

通过减少总的能源消耗量，电力加热过程同样确保了温室气体排放量的减少。一些特殊技术的实现，进一步降低了环境污染，比如在可控的大气层中的加热（电磁感应、无线电高频技术）等。

3. 提高了产品质量

许多已经完成的产品的质量从根本上来说依赖于加热处理的结果。在多数应用中，电力技术对于在特定约束条件（比如高产量和快速反应）下达到产品质量要求来说有着最好的能力。更重要的是，它们能在提高产品质量和价值的同时节约能源。

4. 提高了生产的速度

古典的加热技术非常消耗时间，由于材料的厚度、导热性以及表面特性的影响，加工器件通常需要相当长的时间来达到设定的温度。另一方面，温度界限和温度梯度应该被精确设定来避免产品损坏或者不良变化。一些电力技术（直接电阻加热、电磁感应或者绝缘导热）能在不超过表面温度极限的情况下加快材料加热的速率，这些操作程序的效率通常比传统的烤箱、加热隧道和辐热加热器的效率要高很多。提高的传热率和高效率变成了更快的生产率和更低的能源成本。

5. 以电力为基础工序的加热系统是可控的

在大多数设备中，一种相当简单的控制系统用于在加热过程中维持合适的能量输入值和其他电气或技术参数。

6. 改善了员工的工作环境

由于电力加热技术不消耗化石燃料，所以工作环境可以通过降低温度和消除车间的燃烧物而得到改善。

10.1 工业电力加热的通用特性

电力加热技术包含通过电能供能的大功率加热过程并且占了工业电力消耗的很大一部分，在 20% ~40% 之间变化。图 10.2^[6]所示为工业上不同电力加热过程所占的比例（在这个图中，“其他”包含了像紫外线、等离子体、气刀、电弧等技术）。

就像之前预测的一样，和其他方法相比，电力加热技术的工业应用使得能源得以节约并且产品质量得到了提高。它们有以下这些主要的特征^[7,8]：

1) 电力加热技术使用电流和电磁场来加热各种各样的材料（金属、陶瓷、天然纤维、聚合物和食品等）。

2) 目前它们与许多工业流程息息相关，涉及加热、溶解、退火、干燥、蒸馏、分离和涂层等。

3) 大部分电力加热装置能非常精确地操控，并且让材料处于可控的气膜之中。这些属性保证了产品更加优质，材料和能源浪费更少，并且减少了操作时间，也就是节约能源，降低成本并且减少 CO₂ 的排放。

4) 有时候，对于一些特殊的工艺流程（比如高温加热和溶解或者局部硬化金属）和新材料的生产来说，电力加热技术是非常独特的解决办法。它们也能促进像纳米电子和光电子等新技术的发展。

5) 在高温中应用，电力加热装置通常比它们的替代品（基于直接燃烧燃料获得能量的炉子）效能更高。电炉的最佳效率能达到 95% 的过程效率，然而等效的燃气炉的仅为 40% ~80% 。

6) 通常，以电力为基础的加热系统在使用时不会放出气体（NO_x，SO_x，CO₂ 或者其他气态产品）、灰尘或者危险的盐分和金属，因此能够改善工作环境。

7) 它们是涉及高温的工艺流程的唯一解决方案。

图 10.3 显示了目前用于工业上的电力加热技术的基本分类^[7,9]。表 10.1^[5]表明了它在工业上的应用潜力。这个表格显示了应用于特殊工业群的电子技术依赖于工厂中的实际工艺流程，交叉点都定性地贴上了应用潜力的高低（高、中、低）的标签。

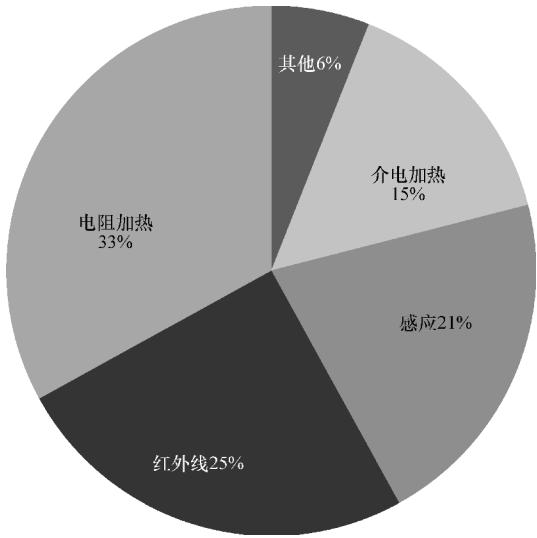


图 10.2 不同电热技术分布饼图
(基于参考文献 [6])

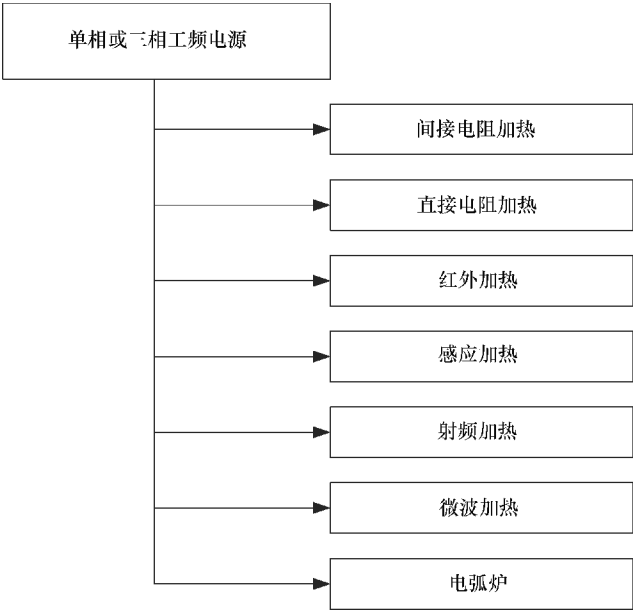


图 10.3 工业中电热处理重要性分级

工业实践明确地证实，除了技术上的好处，从能源消耗和 CO₂ 排放的角度来看，电力加热工艺非常有优势。图 10.4^[7] 显示出全球不同的干燥技术之间的比较，并且强调了在这一地区，与传统的技术（油热技术和燃气技术）相比，绝缘加热（指在这种情况下的微波方法）才是最好的选择。

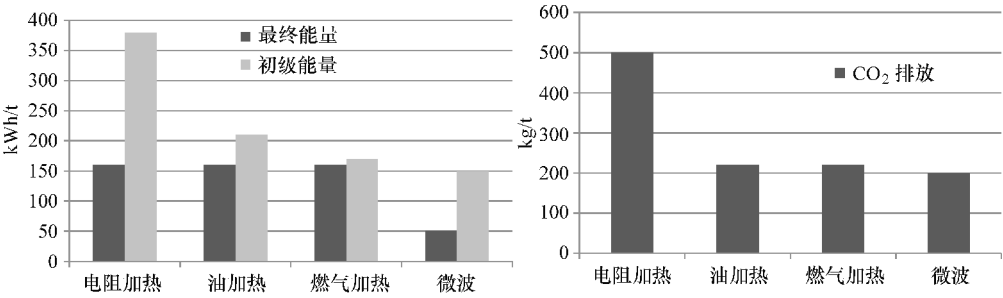


图 10.4 不同干燥技术的最终及基本能量和 CO₂ 排放（基于参考文献 [7]）

图 10.5 说明了又一个重要的例子：熔化铝的能源消耗和 CO₂ 排放量作为两种技术被进行比较，即一个大的燃气炉和一个大的电磁感应炉（CIF）。

在图 10.5 中，所分析的数量参考自以下方面：

- 1) 初级能源：分别代表用以加热炉子（比如燃气炉）所需的能量和在发电厂中用于产生必要数量电能所需的能量。
- 2) 最终能源：熔化过程中所需的能源。
- 3) CO₂ 排放：与初级能源使用相关的数据。

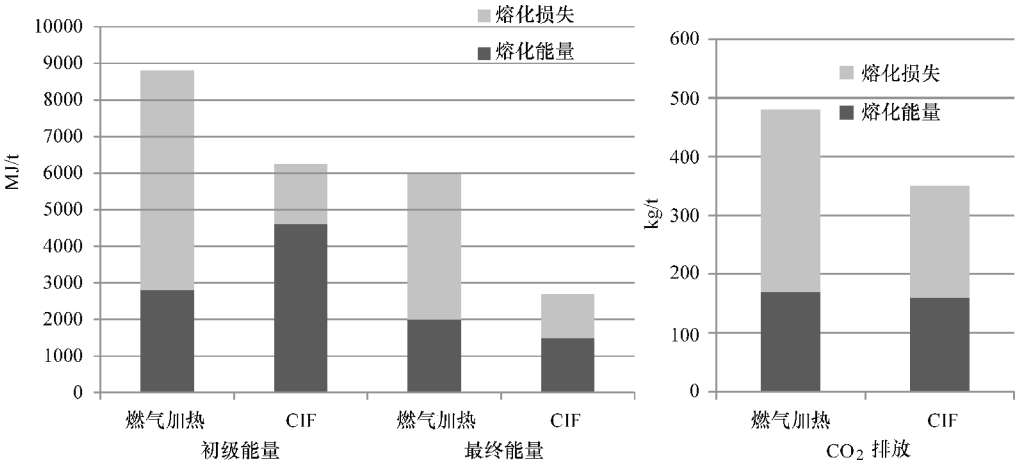


图 10.5 熔化铝的所需能量及 CO₂ 排放（基于参考文献 [7]）

对于图 10.5 中的每一个柱条，上半部分表示熔化损失对应的能量，下半部分表示熔化过程所用的能量，对比分析图中的数据可得如下结论：

- 1) 如果把熔化过程中损失的等效替代能量考虑在内，熔化等量的铝，电子炉比燃气炉消耗更少的能量。
- 2) 最终能源的成本保险和运费（CIF）同样很低。
- 3) 高频感应炉排放更少的 CO₂。
- 4) 初级能源和最终能源相对不同的地方是 CIF 的最大值，这个比例通常与电力生产有关。

表 10.1 电加热技术在工业中的应用潜力

电力技术	食物	纺织	制衣	皮革	木材
红外线	M	H	M	M	M
感应	L	M	L	L	L
射频	M	H	L	L	M
微波	H	L	L	L	L
直接电阻加热	M	L	L	L	L
间接电阻加热	H	M	M	M	M

电力技术	造纸	印刷及其相关	石油和煤矿	化学制造	塑料和橡胶	非金属矿物
红外线	H	H	M	M	H	H
感应	L	L	L	M	M	M
射频	M	L	L	L	H	L
微波	L	L	L	M	M	M
直接电阻加热	L	L	L	L	L	M
间接电阻加热	M	M	M	M	M	M

(续)

电力技术	基础金属制造	焊接金属制造	机械制造	计算机及 电子产品制造	电气设备、 应用及元件
红外线	M	H	H	H	H
感应	H	H	H	M	H
射频	L	H	H	L	H
微波	M	L	L	L	H
直接电阻加热	H	M	M	M	M
间接电阻加热	M	M	M	M	M
电力技术	交通设备制造	家具及其相关 产品制造			
红外线	H	M			
感应	H	M			
射频	L	M			
微波	L	L			
直接电阻加热	M	M			
间接电阻加热	M	M			

注：H = 高；M = 中；L = 低。

10.2 主要电加热技术

基于不同电力基础的加热技术保障了电能加热不同材料时转化为所需的热能。在直接加热的情况下（如直流电阻加热、介质加热法和感应加热），热量在材料中产生；非直接加热法（间接电阻加热法、间接辐射法、红外线、电弧、镭射等），能量从热源中通过传导、对流、辐射或它们相组合的方法进行转化。

在大多数过程中，需要一个围场来隔离加热过程和它所处的环境。围场阻止热量散失并保障辐射（如微波或红外线）不外泄，限制气体的燃烧和挥发以及材料本身的散失，控制材料周围的大气并使之充分混合。

目前最重要的电加热技术是电阻加热（直接或间接）、红外线辐射技术、感应技术、介质加热法和电弧炉。根据加热过程要求、系统规模大小和操作技术的不同应用于工业的不同领域。

10.2.1 电阻加热

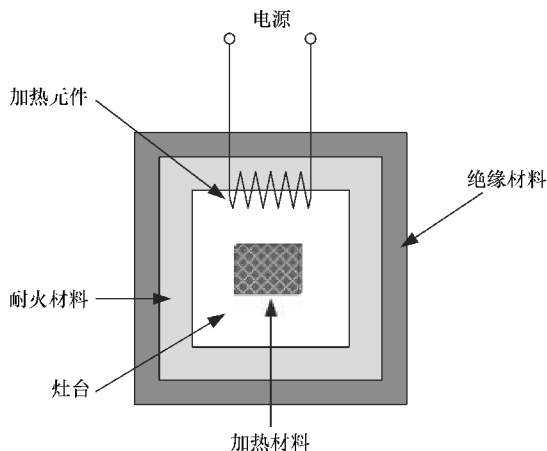
电阻加热是最简单（也是最老的）基于电力的加热方法，可加热金属、熔融金属或非金属，效率几乎可达到 100%，同时工作温度可达到 2000℃，故而可应用于高温加热，也可应用于低温加热。由于其可控性和快速升温的特性，电阻加热应用于从加热熔融金属到加热食物的方方面面，有两种基本方法：直接电阻加热和间接电阻加热。

10.2.1.1 间接电阻加热

1. 原理

间接电阻加热包括通过一系列由高阻值材料做成的加热元件的线频率电流加热，此类材料一般为石墨、硅、碳化物或者镍铬化合物。当电流流过这种元件，热量通过焦耳效应生成，并通过传导、对流、热辐射的方式转移到工作零件。加热一般是在具有内衬的熔炉里进行，不同的变化根据目标材料而定，整个间接电阻加热系统的外形如图 10.6 所示。

全部过程中，材料温度可从室温至 1700°C ，加上内部温度可达更高，这取决于系统的用途和加热元件的类型。当初始温度低于 650°C 时热量的传递方式通常是热对流，然而当温度更高时通常是热辐射。

图 10.6 间接电阻加热概图^[7]

通常，这种加热方式会在一个绝缘良好的外壳内，典型的熔炉材质为陶瓷、砖块、纤维；同时，熔炉内部可以是空气、惰性气体或者真空（在高气温下惰性气体可以环绕工作零件防止材料表面的腐蚀）。这种方法可以把热量损失最小化，同时保证高的加热效率，一般可达 80%。

2. 系统类型及应用

间接电阻加热可以应用于以下方式^[4,5,8]：

- 1) 传统的加热方法使用各种各样的包裹加热器，其中电阻元件封闭在绝缘体中（需要隔离层来使加热元件、工作环境相互隔开），通常这种方法适用于低耗能的场合；
- 2) 直接连接被加热材料（在这种情况下加热器放置在需要加热的流体中或者靠近需要加热的固体，例如水油浸加热元件）；
- 3) 通过加热媒介（典型的是水或者空气）；
- 4) 热源在热绝缘外壳（作为规定，在高温工业应用中使用电阻炉）。

在熔炉应用中，各种类型的加热元件和外壳可以使用，这取决于温度，被加热产品和过程的需要。有 4 种常见的电阻炉：

- 1) 普通或者可控温电阻炉；
- 2) 批量生产或持续过程电阻炉；
- 3) 自动加料电阻炉；
- 4) 持续自动加料电阻炉。

间接电阻加热应用于各种不同领域,包括:

- 1) 金属熔炼或者玻璃加工等高温行业,包括金属预热或加热锻造和烧结等(加热结合精炼过程,需要提升温度去消除熔体中的杂质和气体);
- 2) 低温加热和熔炼(对非金属固体和液体);
- 3) 热处理,广泛应用于金属生产回火和退火的玻璃及陶瓷产品;
- 4) 煅烧(相似的应用包括铸造材料,比如水泥和砖块,石灰制造过程和造纸工业,阳极生产从石油中冶炼铝,从原材料中去除多余的水制造光学材料、玻璃);
- 5) 积聚和烧结(通常应用于制造先进陶瓷和特殊金属冶炼);
- 6) 烹饪、烘焙和烧烤的食物生产;
- 7) 干燥和固化过程(应用于含金属和非金属材料的涂料,包括陶瓷和玻璃;原材料的含水率必须降低的石头、泥土和玻璃行业;食物生产、纺织制造和化学产业);
- 8) 流体(比如水、石蜡、酸、苛性碱溶液等)、空气和气体的加热;
- 9) 汽化。

大部分以上提到的应用同样可以由不同类型的燃料加热系统或者蒸汽加热系统完成。在很多情况下,电阻加热因其简易和效率而备受选用;另一方面,还有其他许多混合应用,包括推进燃烧炉内的生产能力。

3. 优势与不足

间接电阻加热有许多优势使其得到广泛应用,部分优势如下:

- 1) 即使是旧设备也可以简单、灵活地更换燃料油或者燃烧器;
- 2) 便于控制,可自动控制;
- 3) 维护成本低;
- 4) 加热装置气体燃料燃烧不产生烟雾、粉尘,改善工作环境,减少环境污染;
- 5) 设备简易,适用于各种不同类型的加热技术过程(包括需要特殊气体氛围和真空),大幅提高生产质量,降低能量损失。

另一方面,间接电阻加热也有一些不足和需改进的地方:

- 1) 工作温度受到耐火材料熔点的限制(比如石英:1700℃;熔铁:2000℃;锆:2400~2500℃;石墨:3000℃等)、电子加热设备的温度限制(镍:1000℃;锆:1800℃;钨:2800℃等,要强调的是工作温度必须限制在允许最高温度以下,否则设备就会报废),一些加热元件见10.2;

2) 加热效率受到热量在加热元件和受热物体之间传播速度的极大影响,同时受到绝缘效率效果的影响,有时运行成本会过高。

4. 典型性能

间接电阻加热的典型性能如下:

1) 电能转换：高于 95%；

2) 能量密度：熔炉壁表面有 $15 \sim 25\text{kW/m}^2$ 的设施配备金属抗性，配备 70kW/m^2 的非金属抗性。

5. 应用注意事项

有了合适的加热技术和良好的设备，其他因素也要考虑：

1) 所需的加热过程（加热、熔化、预热、热处理、烘烤等）；负荷特性：种类（金属/非金属，固体或者液体）、尺寸、工作温度（直接影响热量转移方式：比如超过 500°C 时主要是热辐射）。

2) 家庭应用（根据设定温度），加热元件的形状（根据熔炉的外形和大小）。

3) 熔炉操作方法，通过炉壁和开口的最大热损失。

10.2.1.2 直接电阻加热

1. 原理

直接电阻加热是使电流直接通过被加热的工件，引起温度上升。基于此，直接电阻加热常常被看作“传导加热”。直接电阻加热是焦耳定律的例子：通过工件的电流由于工件本身的电阻形成热。被处理的材料必须有一定的电阻，但有更大电阻率的材料，比如钢铁，会具有更高的电阻和产生更多热量，从而使得加热过程更有效率。

如图 10.7 所示，直接电阻加热器的安装基本包括一个恒压单相变压器，电流在固定的总线及可调跳线中流动加热。自耗电极或非自耗电极与加热对象物理接触，现有几种不同的实施方法：金属加热采用固定连接器（钳形）或活动连接（滚动型）；水下电极加热熔融金属或液体。此种连接器或电极材料必须与被处理的材料可共存。

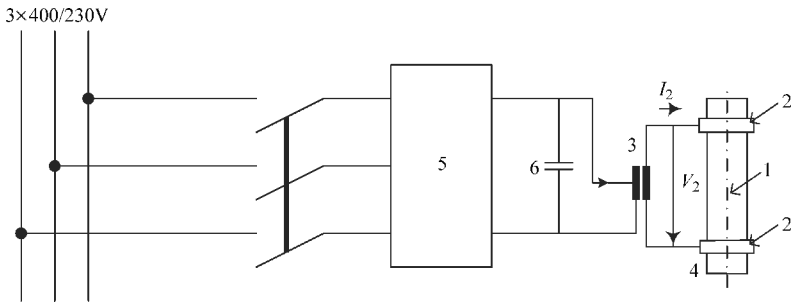


图 10.7 直接电阻加热器安装概图

1—加热部件 2—连接部 3—变压器 4—可调跳线 5—对称系统 6—PFC 电容

调节电流可控制温度，使用的电流可为交流电也可为直流电。低频电流（直流或 50Hz 交流）可加热工件整体，高频电流则只加热工件的表面。

直接电阻加热器安装的等效电路图可由图 10.8^[10,11]中的简化串联电路代替。

在电路图中，外电抗 X_e 可算入变压器的直流电抗（参考二次侧）及大电流回

路的外电抗。 R_e 代表同样元件的电阻, R_c 是接触电阻。 X 和 R 分别为负荷总线被加热的内部电抗和交流电阻, 这两者在加热瞬间会产生巨大的变化。

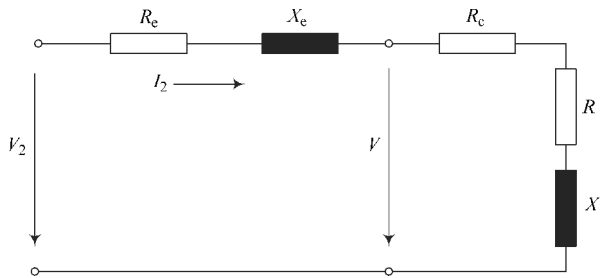


图 10.8 直接电阻加热器的简化等效电路
 V_2 —变压器二次侧电压 I_2 —加热电流

表 10.2 加热元件类型

加热元件	材料	最大允许温度/℃	应用特点
铁镍铬合金	Fe-20Ni-25Cr	900	由于可靠性高和价格便宜, 应用广泛。工作温度宽泛。可适用于易氧化环境
	Fe-45Ni-23Cr	1050	
	Fe-65Ni-15Cr	1100	
	80Ni-2Cr	1150~1200	
铁铬铝合金	Fe-22Cr-14, 5Al	1280	与同样价格的镍镉材质相比能承受更高温度。第一次使用易脆化。适用于易氧化环境
	Kantal AF	1400	
非金属合金	SiC (碳化硅)	1600	加热棒易脆化, 易受热能和机械冲击。适用于易氧化或还原性环境
	Cr ₂ O ₃ La ₂ O ₃ (钨铬)	1800~1900	
	石墨	2500	加热棒费用低。适用于中性、还原性环境, 或真空环境
贵金属	钨	2300	费用高昂。仅适用于中性、还原性环境, 或真空环境
	钨	2500	
	钽	2500	

等效电路参数的详细数据已在参考文献 [10] 和 [12] 中给出。为了合理地设计一个加热装置, 适当估计 X_e 的值非常重要, 因为它对变压器 VA 值有重大影响。有同样影响的还有对于总线中电流 (决定了接触点的寿命) 最大值的估计、表面效应 (决定了总线横截面的电流密度) 和电路功率因素。

电抗 X_e 主要由变压器大电流二次侧电路产生, 并与其几何构造有很大关系。

以上提及的几点为我们计算 X_c 提供了理论步骤，并且考虑了导体的几何构造和横截面的变化。邻近效应和趋肤效应的结果可以忽略（与加热总线上的电流密度统一）。

同样的过程存在于加热的元素内部阻抗（电阻和电抗）中。在这种情况下，以下因素要被考虑：材料的特性、它的集合结构和尺寸大小以及加热电流的频率（直流或交流），必须提及的是这些参数的动态值取决于电流和温度。然而，现代计算软件支持加热过程中明细的数值分析，提供每个加热瞬间的瞬时值。为达到这样的目的，材料在通电时和加热时随温度和电磁场强度变化（磁导率）的物理特性应考虑在内。

2. 系统和应用的类型

现如今，直接电阻加热在工业中应用广泛^[5]：

- 1) 金属加热机（为进一步成型的二次加热，如挤压、热处理等）和电阻焊机（点焊机、缝焊机等）；
- 2) 非金属加热机（加热或融化玻璃、碳化硅、盐浴等）；
- 3) 食物烹饪和消毒；
- 4) 蒸汽生成器（如高压电炉、HVAC 系统中的加湿器）。

这些类型的系统在如下领域中有所应用：

- 1) 热处理或熔化金属和玻璃；
- 2) 在加工成型前加热含铁的金属材料；
- 3) 连接金属：点焊、缝焊、闪光焊；
- 4) 加热水和蒸汽发生器；
- 5) 石墨电极和碳化硅的生产。

3. 优点和局限性

直接电阻加热器有如下优点：

- 1) 加热效率高归因于两点重要因素：①只有工件才被加热；②工件表面的辐射和对流损失非常小。
- 2) 由于工件具有高功率密度（高达 105kW/m^2 ），同时最后的温度和温差的精确可控性，加热时间得以减少。
- 3) 现有的科技可以仅加热复杂产品的一部分。
- 4) 加热过程可以迅速开始（在几秒钟之内）且不产生燃烧生成物。
- 5) 仅需要更低的设备空间和更小的物资投入。

同时，以下限制条件也该考虑其中：

- 1) 接触表面要保持清洁，好的电源接入规模无上限，然而为避免自身熔解，接触表面和接触压力的数量必须合理选择；
- 2) 这种配置必须提供现实的高耐电流，但均匀截面也需要均匀加热；
- 3) 工作条必须长且细（比如长度：直径至少 6:1），直接加热比小范围的截面

加热更适合（比如直径小于 3cm）；

4) 大型系统（如玻璃融化）由于电源额定功率的限制可保持适当的生产速率；

5) 功率因数可能非常低（0.3 ~ 0.95）。

4. 典型活动

1) 电量转换：大约 95%；

2) 整个过程的效率：典型的为 75% ~ 95%；

3) 能量消耗：200 ~ 350kWh/t。

5. 应用注意事项

对于设备的正确操作，以下因素应该被考虑进去：

1) 材料的形状、大小和同质性以及电阻率；

2) 连接电阻（本身热量）；

3) 通过表面（辐射和传递）和连接（传导）的热损失；

4) 电压和能量供应（所需的 DC、AC、容量）；

5) 趋肤效应（耗散功率随着频率和深度渗透的电流变化）。

10.2.2 红外加热

10.2.2.1 原则

红外加热是另一种间接电阻加热，通常由电磁波传递能量，由加热到相对较高温度的镍或铬制成，如图 10.9 所示^[4,10]。

红外（波长 λ ：0.78 ~ 10 μm ）加热通常分为 3 种：近红外或短波红外（ $\lambda = 0.78 \sim 2\mu\text{m}$ ）、中红外（ $\lambda = 2 \sim 4\mu\text{m}$ ）和远红外或长波红外（ $\lambda > 4\mu\text{m}$ ）。尽管电子红外线通常被运用于仅加热物体表面，但也可运用于许多加热场合。

如图 10.9 所示，电子红外加热包括发射器、反射系统和控制器（因为运行时间由秒计算且精准的温度和精确的控制都很重要）。多数电子红外加热系统还会包括一个材料控制系统和通风系统。

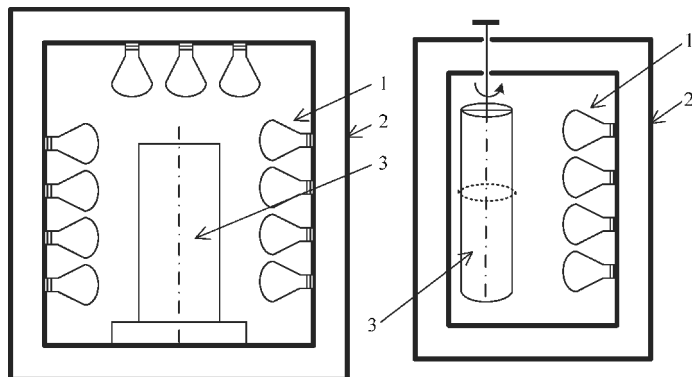


图 10.9 红外加热器概图

1—红外线发射器（包括反射系统） 2—围场 3—加热部分

10.2.2.2 系统和设备的类型

红外加热通常运用于被加热的物体在（发射或反射）可视范围内。然而，一些红外加热系统可以加工处理（不在可视范围内的）涂层（例如，在管道内运用红外加热处理在管道外的涂层：尽管是由导电性完成的处理，它也被运用于红外加热过程中）。

前面提到过，在红外加热系统中运用的发射器是在红外加热过程中反射能量的固态电阻器，见表 10.3，发射技术和发射行为与 3 种红外线辐射谱带相一致。

表 10.3 红外线

发射器	近红外		中红外		远红外
	真空状态下的钨纤维		石英或硅中的 镍铬金属丝	钢复合元素	嵌入在 Pyrex 玻璃或 陶瓷中的元素
	玻璃或石英灯	带反射镜的石英管			
功率/W	150	12 ~ 14cm； 500	30 ~ 250cm； 6000	600 ~ 6000	150 ~ 1000
	250	27 ~ 28cm； 1000			
	375	64 ~ 70cm； 5000			
工作 温度/℃	2000	2200	石英管：1050	750	Pyrex 面板：350
			硅电池板：650		陶瓷元素：300 ~ 700
最大产品 温度/℃	300	600	石英管：500	400	Pyrex 面板：250
			硅电池板：450		陶瓷元素：500

由曲线的形状决定的辐射能量的光谱分布应当与温度和波长的光谱分布相对应，为了在预想的波谱范围内设定辐射能量，需要遵守以下规则：

- 1) 对于短波和中波辐射，发射器温度必须高于规定的波谱上限；
- 2) 对于长波辐射，温度必须接近发射带的最低限制，甚至在中波的较长波部分也是如此。

电子红外加热系统被很多制造领域用于加热、烘干、处理、热结合、烧结和杀菌消毒。他们经常和热空气结合起来移除水蒸气来防止表面过早硬化，例如：

1. 在各种支持下烘干和聚合涂料

- 1) 在金属、木头、玻璃、纸和纺织品上烘干油漆、清漆、粘合剂、油墨或搪瓷；
- 2) 在皮革或兽皮或纸上涂料；
- 3) 纺织物上树脂和不同增塑剂的聚合。

2. 脱水和局部烘干

- 1) 纸、硬纸板、纺织物（包括水性涂料和墨水）；
- 2) 塑料颗粒和洗板的烘干；
- 3) 在弯曲和粉末涂料硫化之前对塑料管预热。

3. 杂项加热

- 1) 清洗过的金属零件干燥, 喷丸清理或热处理前的预热和加热处理 (低温吐火、硬化等);
- 2) 烘干脱水的面包、小面包和饼干;
- 3) 食物和烤肉的再加热;
- 4) 牛奶和果汁的巴氏灭菌与消毒;
- 5) 木板和烟草的烘干;
- 6) 塑料包装的热缩。

10.2.2.3 优势与局限

在以上提到的应用中, 红外加热系统呈现为一种高效的有吸引力的加热方法。它的主要优势如下:

- 1) 高能量效率 (根据光学定律, 不用接触也不用任何明显的直接吸收, 能量从反射器传递到工作板表面);
- 2) 高能量密度的可能性 (达到 $30\text{W}/\text{cm}^2$, 加热系统的低热惯性和高温快速升温);
- 3) 极短的启动时间和更少的加热时间 (过程快速);
- 4) 能量辐射可以集中、聚集、直射或反射, 可以方便地控制加热过程;
- 5) 压缩设备 (由于过程中温度相当低, 在体积上比热空气烤箱小好几倍)。

从工作原理看此技术的缺陷:

- 1) 最适用于层状或者片状产品 (当加热体积大的器件时, 需要较长时间才能完全加热);
- 2) 处理复杂形状的材料较难;
- 3) 在污浊环境里对红外线反射器的维护要求更高。

10.2.2.4 典型操作

- 1) 可替换的能量密度比对流更高;
- 2) 应用的资金投入更低;
- 3) 低维护, 初级反射器清理和替换;
- 4) 与可选加热过程相比效率高。

10.2.2.5 应用注意事项

如前面所述, 红外加热系统是根据光学定律把热能从反射器传递到物体表面的。辐射吸收在特定高度逐渐被取代, 这也是一个精选的现象, 多数取决于偶然波长和材料厚度。另一方面, 反射多数取决于物体表面条件和偶然辐射的波长。

对于高效来说, 这就导致了被加热的工作板应该对辐射适当地吸收和较低地反射。对于这一点, 被加热源反射的波长在产品最大吸收幅度范围内是可预想的, 如图 10.10 所示^[4,10]。

分析精选红外加热可能性时, 以下因素应该被考虑其中:

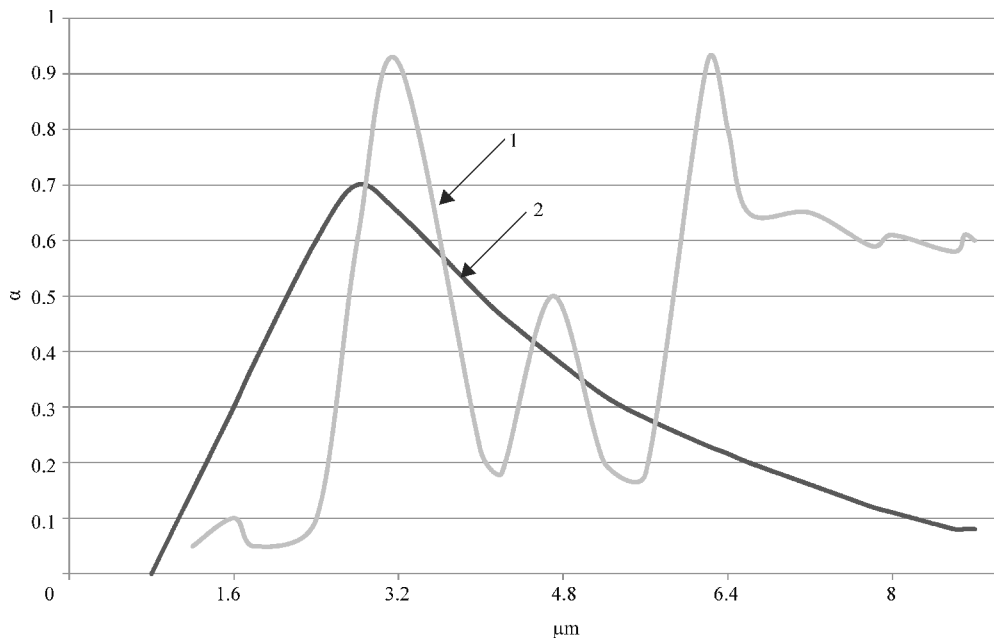


图 10.10 被加热物最佳吸收光谱 (1) 及反射光谱 (2)

- 1) 从基于被处理的产品吸收特性来考虑，对于加热形式（烘干、加热、硫化等）和需要的反射波长，后者决定于材料的种类（例如，溶剂基 VS 粉末涂料）、厚度、表面条件等；
- 2) 产品形状（对于复杂形状部分，整个元件各个面接受的能量会随着辐射的入射角和距离变化而变化）；
- 3) 加热过程的方式（持续或分批处理）和烤箱特征（例如，产品和反射器发生共振）；
- 4) 反射器的类型（工作元件的温度、能量密度等），反射器和加热产品之间的距离和通风设备。

10.2.3 感应加热

1. 原理

感应加热是把电感线圈（电感器）产生的交变磁场施加于导体中，如图 10.11 所示，变化的（振荡）磁场产生的电流（感应电流）流过导体，并通过焦耳效应进行加热。除了涡流感应所产生的热量之外，磁性物质也会通过滞后效应产生热量：磁性通常会对快速变化的电场产生阻碍，并且产生足够的摩擦来提供二次热源（不过二次加热过程会减轻重量，并且会在材料消磁时对应的温度下消失，即居里点时消失）。

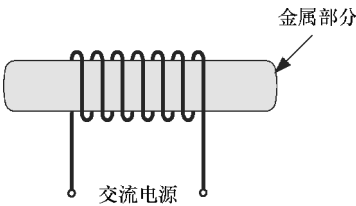


图 10.11 感应加热

感应加热与电力变压器的原理相同^[15]。一次电路（感应器）通过短路电流产生变化的磁场，而短路电流流过的加热金属块代表二次电路。当变化的电流集中在导体外部时（趋肤效应），物体中用来加热的感应电流是最大的，并向中心而逐渐减小。趋肤效应以所谓的穿透深度 δ 来表征，穿透深度的定义是从物体表面开始到能量剩余 87% 的层的厚度（见图 10.12^[16]）。穿透深度 δ （m）可由麦克斯韦方程计算得出：

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

(10.1)

式中 ρ ——材料的电阻率（ Ωm ）；
 μ_r ——被加热材料的磁透率；
 f ——电流频率（Hz）。

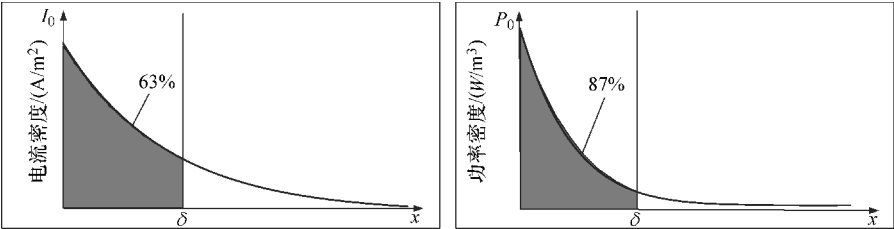


图 10.12 穿透深度^[16]

磁场的频率和被加热材料的特性影响着加热的深度，频率调节为控制加热深度提供了可能性，并且通过这种方法，可控制加热系统中的其他参数，如能量转化率、功率因数、融和点和熔点等。表 10.4^[13]给出了几种磁场频率对材料加热深度影响的值。

热量强度会随着表面的距离增加而减小，故小而薄的东西一般比大而厚的东西易于加热。尤其是体积大的元件需要被完全加热的时候热量消耗更大。

表 10.4 穿透深度^[13]

材料		钢	钢	铜	铜	石墨
		20℃	20℃	20℃	900℃	20℃
$\rho/(\mu\Omega\text{m})$		0.16	0.16	0.017	0.086	10
μ_r		40	100	1	1	1
δ/mm	50Hz	4.50	2.85	9.31	20.87	225.08
	100Hz	3.18	2.01	6.58	14.76	159.15
	1kHz	1.01	0.64	2.08	4.67	50.33
	10kHz	0.32	0.20	0.66	1.48	15.92
	100kHz	0.10	0.06	0.21	0.47	5.03
	1MHz	0.03	0.03	0.07	0.15	1.59

2. 系统和应用的类型

感应加热是使一个通电线圈接近被加热物体来完成加热的。对于加热处理的过程，有两种不同的方法：

1) 直接感应加热：这是一种使用可调磁场直接加热材料的方法（在被加热的材料中诱发涡电流，通电线圈与被加热物没有任何直接接触）。直接辐射加热基本用于金属工业，用来熔化金属、加热或热处理。

2) 间接感应加热：在这种情况下，电磁场在某种导电材料中诱发涡电流（也被看成承受器），这种材料直接与被加热物接触。间接感应加热被用于加热塑料或其他非导体，但首先通过加热一种导体，再由它把热量传递至被加热物。

感应器和被加热的部件可视为一个被电容补偿感应板，同时通电线圈有一个频率调节器提供特定频率的单相电流。感应设备其他部分是：降温系统（为感应器和频率调节器降温）、传导系统（若加热过程需要）和必要的控制系统。从电力支持的角度看，可添加以下部件：

1) 50Hz 装置：补偿板直接与工业分布网相连接；

2) 含有晶闸管的频率调节器（调节功率至 10MW）在 0.1 ~ 10kHz 之间的工作效率为 90% ~ 97%；

3) 含有晶体管的频率调节器（调节功率至 500kW），频率范围为 500kHz 时的效率为 75% ~ 90%；

4) 含有电子管的频率调节器（调节功率至 1.2MW），频率为 3MHz，效率为 55% ~ 70%。

感应加热一般用于金属熔液、金属加热锻造、钎焊、焊接及种种表面加工。加热非金属材料也是可以的（但需要高频磁场）。

金属的直接加热（冶金应用）

1) 熔炼或熔融钢、生铁、铝、铜、锌、铅、镁、贵金属及合金；

2) 前期成型、锻造（厚板、薄片、管状、条状等）并选择加工部分的金属或非金属材料；

3) 热处理（硬化齿轮、退火管材、焊接、拉丝、压薄等）或金属部件的前期表面热处理（清洁、剥离、干燥、镀锌、包锡、上釉、涂有机涂层等）；

4) 钎焊、焊接。

在金属容器中的材料间接加热

1) 在塑料工业中加热磨具或滚筒及制造树脂、油漆或墨水的化学反应；

2) 在食品工业中加热桶；

3) 融化结晶玻璃，融化难熔的氧化物和核废料。

3. 优点与限制

根据工作原理，感应加热有许多重要优点，例如：

1) 反应速度很快 (几乎可以立刻反应), 而且效率很高 (总体平均效率可达 70% ~ 75%, 最大可达 90%, 另外在不工作时没有能量损失), 因此生产速度更快, 产生的温度更高;

2) 在加热速度极高的情况下 (由于功率密度较高: $50 \sim 50000 \text{ kW/m}^2$), 允许局部加热 (在加热干扰组件时没有风险) 和可控深度穿透加热;

3) 如果能源和待加热物体之间没有物理接触, 通过在真空或者惰性气体中加热, 则可能得到极高纯度的物质;

4) 可以减少氧化损耗并且不存在脱碳反应;

5) 可以有效改善工作条件 (减少热量和噪声在当地的排放) 和环境条件 (消除燃烧产物);

6) 电能输入到物体内能被线圈形状、场强和应用时间精确控制;

7) 它使用熔池在熔化过程中不断搅拌 (这有利于快速熔化和合金均匀);

8) 良好的重复性 (经常执行重复的操作, 一旦一个感应系统需要对一部分进行校正, 工作部分会自动增加或减少负荷)。

接下来我们必须考虑感应加热的局限性:

1) 和其他加热技术比较, 感应加热投资巨大;

2) 它不适于锻造形状不规则的工件;

3) 它必须定期更换电感器并且有时由于形状原因导致补偿片不能重复使用;

4) 电感器和负荷的功率因数通常在 0.05 ~ 0.6 之间。

4. 典型性能

1) 效率取决于操作参数: 电感器外形、电感器与材料之间距离、待操作材料的自然属性和电感器的导电性等;

2) 它的输出功率可高达几兆瓦。

5. 应用考虑

1) 根据材料的性质, 需要选择直接 (金属材料) 或间接 (非金属材料) 加热的方式, 但是后者只在某些特殊场合应用;

2) 应首先分析待加热物的形状和尺寸, 有时对于某些待加热物 (长且细), 直接电阻加热效率更高;

3) 电感器的构造要与材料尽可能相匹配 (为了减少电感器与负荷之间的气隙, 从而提高功率因数和效率);

4) 需特别注意待加热材料的参数 (磁渗透、电阻率、热导率) 以及这些参数随温度的变化;

5) 磁场变化频率的选择很重要, 因为它对能源效率和功率因数有决定性影响, 如图 10.13 所示^[4,10]。

10.2.4 介电加热

介电加热用来加热导电性差 (且导热性差) 的材料且与两种加热方法相似:

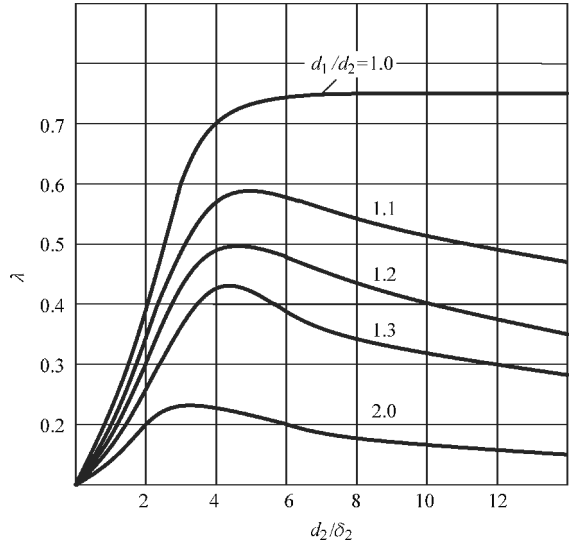


图 10.13 感应加热系统功率因数 λ 的变化 (d_1 —电感器内部直径;
 d_2 —电感器外部直径; δ_2 —电感器穿透深度)

射频加热（RF 加热）和微波加热（MW 加热）。在这两种技术中，被加热材料一直处于高频交变电磁场的作用下。

把一个绝缘体放于高频电场中，材料的电子、质子等分子内的电荷会逐渐与外加电场对齐，这导致材料的内分子快速活动。由于分子间的相互作用（如摩擦）会产生热能，被称为电能滞后加热或节点加热。热量产生主要依赖于被加热材料的介电性能。在射频加热中，频率在 1 ~ 300MHz 之间；而对于微波加热，频率在 300 ~ 30000MHz 之间，一般取 2.45GHz。为了防止与通信设备发生冲突，已经为介电加工工业预留出了几个波段。

介电加热最重要的优点是热量直接从被加热材料中产生，和其他通过加热材料外表面的常见加热方法（空气加热、红外加热）对比，介电加热更迅速（当材料是热的不良导体时，热量从外表面传导到内部需要一定时间），而且更有效率（可以节约 15% ~ 40% 的初级能量）。然而，在介电加热系统中增加一个强制通风系统，流动的空气将加热室的湿气带走的同时促进了干燥进程。

不同材料对交变电磁场有不同的反应，因此不是所有的材料都适用于介电加热。例如，水热得很快因为它吸收微波很容易，橡胶同样容易吸收微波。绝缘体容易被加热，是通过我们所知道的损耗系数表现出来的，它反映了材料在介电加热中与两个因素有关（极化和分子摩擦力），表达式如下：

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta \tag{10.2}$$

式中 ε' ——材料的介电常数或相对介电常数；
 δ ——损耗角。

损耗因数越高，材料就可以吸收越多的能量。对于一种给定的材料，损耗因数是可变的，它取决于温度、水分含量（向材料中加盐或碳可增加其损耗因数）和频率。其他因素例如电场方向也有一定影响。当物体由几种损耗因数不同的材料组成时，可能出现有趣的现象。例如，用巴氏杀菌法对包装好的食品消毒，但却不会损坏其包装。表 10.5 给出了一些常见材料的介电性能^[17]。

表 10.5 介电性能

材料	温度/℃	30MHz		2500MHz	
		ε'	ε''	ε'	ε''
水	-12	3.8	0.7	3.2	0.003
	+25	78	0.4	77	13
	+85	58	0.3	56	3
0.1 的盐水	+25	76	480	76	20
0.5molar	+25	75	2400	68	54
氧化铝瓷	+25	8.9	0.0013	8.9	0.009
石英玻璃	+25	3.78	<0.001	3.78	<0.001
尼龙 66	+25	3.2	0.072	3.02	0.041
聚乙烯	+25	2.25	<0.0004	2.25	0.0007
特氟纶	+25			2.05	<0.0005
聚氯乙烯（PVC）	+20	2.86	0.029	2.85	0.016

10.2.4.1 射频加热

1. 原理

在一个射频加热系统中，电场在两片施加交流电压的导电板（电极）之间产生，加热材料放在两板之间（见图 10.14^[5]）。

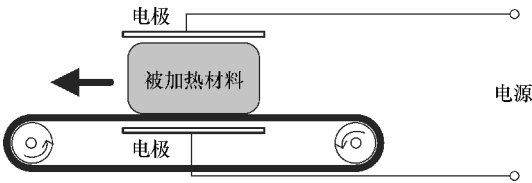


图 10.14 射频加热^[5]

2. 系统类型及应用

如图 10.14 所示，一般情况下，一个射频加热系统包括供电装置，装有待加热产品的涂抹器（操作间）和材料处理系统（有时还包括一个通风系统）。下面是一

些基于不同标准的各种类型系统在工业生产中的应用^[5]：

- 1) 定频或变频加热系统；
- 2) 连续（也就是传输）加热系统；
- 3) 传输系统（以电极配置为特征）——厚平板型、薄网杂散磁场型和交错薄片型电极；
- 4) 管状加热系统（针对液体）。

射频发电机通过功率放大器来控制高频振荡器（也叫做“ 50Ω ”或“定阻抗”），或是含有待加热物体的谐振电路里的功率振荡器（一般称为空载振荡器）， 50Ω 发电机在工业生产中使用最为普遍。综上所述，只有经过核定频率才能在开环系统中使用，对于熔炉来说，那是最切合的保护方法，使用频率在 $1 \sim 300\text{MHz}$ 之间变动。

涂抹器有许多不同的建造方法，取决于具体的产品特性或进程；从电的角度来讲，每一个涂抹器都是一个带有待加热介电材料的电容器（因此射频加热也被称为容性加热）。在射频设备中，可能同时有几个涂抹器，取决于不同的应用，如图 10.15 所示^[17]。

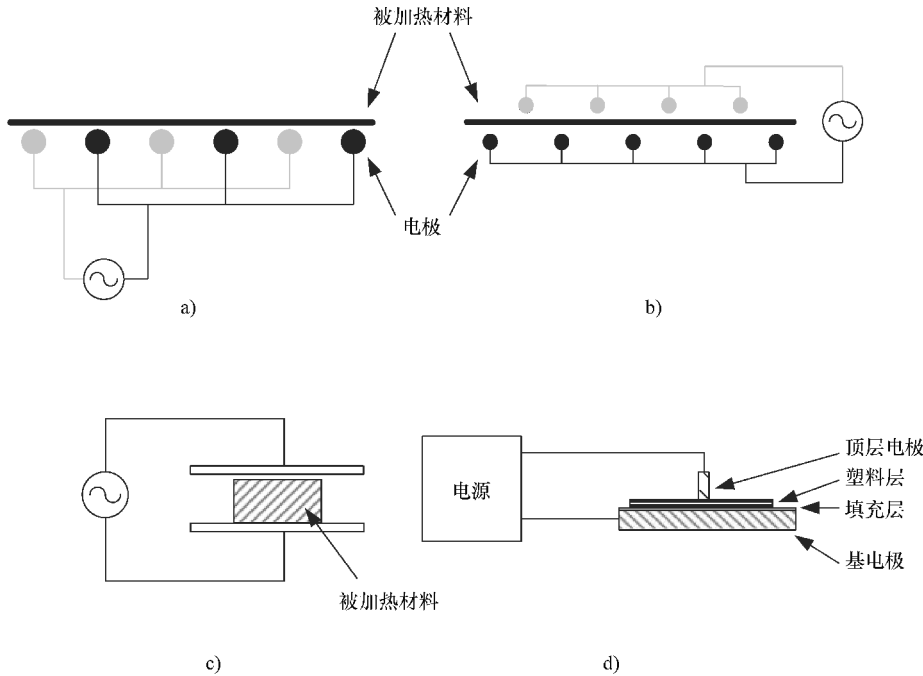


图 10.15 射频加热主要应用类型^[17]

a) 杂散磁场型 b) 交错型 c) 板型 d) 焊接电极

1) “杂散磁场”电极：这种被生产为管状或杆状的电极，设置在待加热产品的一旁。连续电极具有反极性。这种布局使用在产品或层面板很薄（最厚 10mm）、很平，并且有很大表面积的情况下。

2) “交错型”电极（环形排列）：这种布局中，待加热产品放于两排电极之间。这种排列提供一个更加均匀的电场，而电场的密度可以由改变电极距离轻易控制。

3) 板型电极：这种电极是两个平行的板子分别放于待加热产品的两旁（形成平板电容器），这种布局通常用在产品很厚或外形很复杂的情况下。

4) 焊接电极：这种布局主要用在以下情形，比如热塑性塑料焊接，它由一个盘状电极和一个专门设计用于此场合的电极（所需压力施于顶层电极）所组成。

容性加热的主要应用场合如下：

1) 介电材料的加热，只要这种材料有适当大小的损耗因子（胶、塑料、树脂等）；

2) 外形规则的介电材料（纸、硬纸板、木板、纺织品、木材等）中水分的蒸发或干燥水性涂料，像大批量制造的纸中的墨水盒粘合剂；

3) 塑料品的焊接和铅封；

4) 烘干和控制软烤饼、饼干、谷类食物和其他食物产品中的水分；

5) 包装材料中的热处理、杀菌和防污染。

3. 优点和局限

在介电加热优点的基础上（材料直接被加热、可在全程应用高功率密度、有效减少处理时间和占地面积、增加生产力、即时启动和停止等），射频加热特有的优点如下：

1) 高效率，主要应用在要求吸水性好的材料上（全程效率在 50% ~ 70% 之间）。

2) 仅用潮湿材料（对独立或者被隔离的部件更好），可能的功耗密度高达 $200\text{kW}_{\text{RF}}/\text{m}^2$ ；

3) 热传输一定程度上与通风空气的温度和体积无关。

容性加热在工业实现中的主要限制因素有：

1) 高成本，但是相对于高附加值的产品或者花费更少的混合使用方法（例如：红外加热技术、热空气加热技术），容性加热效益更高；

2) 只能使用核定频率，并且要求有昂贵的保护设施，防止电磁辐射。

4. 典型性能

1) 电源变换器的效率（额定输出高达 900kW）：一般为 55% ~ 70%，但使用新的固态、高频率放大技术能达到 80%；

2) 浮动频率系统能提供更高的效率，但要求有更高程度的射频屏蔽；

3) 管道使用寿命：5000 ~ 10000h。

5. 应用考虑

当应用这项技术或者设计该设备时，应当考虑如下方面：

- 1) 被加热材料必须是绝缘体，选定频率（根据材料反应选择变频或是定频）必须和高功率损耗系数相符合（否则电场只在物体表面反应而不会穿透它）；
- 2) 处理工作（加热、烘干、粘合等）可以连续进行；
- 3) 被处理的部分最好是外形整齐、扁平的，与电极和输送机类型特性、功率密度和安装总能量相匹配；
- 4) 具有将高频技术和其他技术相结合的可能性，例如为了减少成本，可以考虑使用红外加热技术或者热空气加热技术。

10.2.4.2 微波加热

1. 原理

微波炉里的物体被微波加热，大量能量穿过内部空间；微波频率越高，能量就越高。工业上常用频率是 2.45GHz。微波比无线电波能量密度更高，通常加热物体也更快。

电磁波是由位于加热室外的微波发生器（磁电管）产生的，如图 10.16 所示^[5]。由于微波的波长与该装置的尺寸相当，因此能量不能

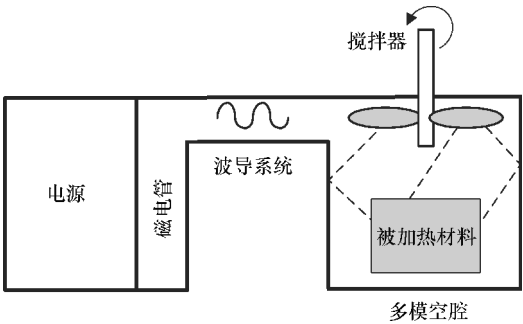


图 10.16 微波加热^[5]

通过标准导体和离散网络传输。在这种情况下，电磁波通过一个叫波导管的管子送到加热室，这种波导管由金属（铜或铝）管制成，并且大多数横截面为矩形，该装置的尺寸取决于频率。波导管可以是直的也可以是弯曲的，但是其内表面必须光滑、干净。之后，电磁波便被置于加热室内的材料吸收。

2. 系统类型及应用

无论是批处理系统还是连续系统都可以通过以下途径实现微波加热：

- 1) 单模式（材料贯穿一个折叠的矩形波导管），如图 10.17a 所示^[17]；

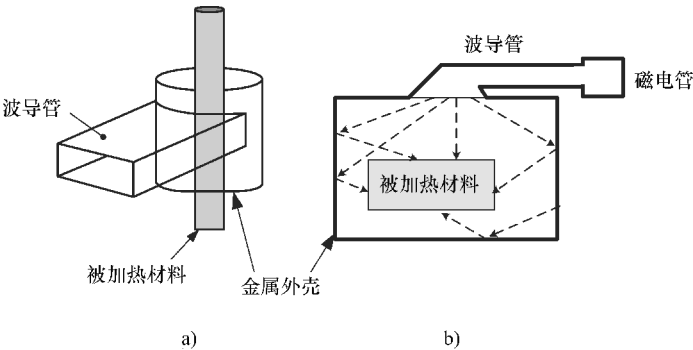


图 10.17 微波加热装置

a) 单模式涂抹器 b) 多模式涂抹器

2) 多模式 (待加热的材料放置在一个大的加热腔或加热炉里), 如图 10.16 和图 10.17b;

3) 管状类型 (适用于液体), 通过蛇状或盘管使驻波得以实现;

4) 辐射开槽式波导管和角状物;

5) 旋转管系统 (适用于颗粒和粉末状材料);

6) 开槽波导管 (适用于网状物)。

近来, 微波加热已经在一些重要的工业中得以应用, 应用范围几乎和容性加热涵盖面一样广, 但微波加热在一些特殊情况下也有应用:

1) 加热蒸发一些需要干燥的介电材料中的水分 (即使材料外形很复杂);

2) 预热和硫化橡胶产品;

3) 加热和解冻冷冻肉类或其他食物产品;

4) 干燥并硬化地毯、纺织品、纸制品、塑料以及电子设备的表层;

5) 烧结陶瓷;

6) 化学进程中等离子体的生产。

3. 优点和局限性

微波加热和射频加热技术拥有相同的优点, 其局限性也很相似, 但还有其他局限之处如下:

1) 只有低功率装置可用, 这意味着需要更多的电源或者限制加热材料的数量;

2) 在一些应用中可能出现不良的加热效应 (失控升温、燃烧), 这取决于加工材料;

3) 对大面积区域很难做到均匀加热。

4. 典型性能

现今, 微波加热设备的典型性能如下:

1) 总共的流程效率在 50% ~ 70% 之间浮动, 能量密度最高可达 $500\text{kW}/\text{m}^2$;

2) 发电机组功率: 2.45GHz 频率时每管功率高达 30kW, 915MHz 频率时每管功率高达 100kW;

3) 功率管寿命: 通常可正常使用 5000 ~ 8000h。

5. 应用注意事项

微波加热应用的注意事项同射频加热相似, 但是对于一些特定的应用, 微波加热通常比其他加热方法更好。

10.2.4.3 射频加热与微波加热之间的比较

射频加热和微波加热都是基于前面介绍的原理的, 然而两者的工作频率不同, 并且这两种电子技术在各种材料的处理方式和使用部件的性质上有很大的差异^[5]:

1) 射频源 (管或固态放大器) 可用的输出功率高于微波源, 这样可以大量减少花费 (射频: 最高 90kW_{RF} ; 微波: 最高 $75 \sim 100\text{kW}_{\text{MW}}$)。总的来说, 射频加热

设备的资金成本大约是微波加热设备的一半。

2) 当没有负荷时射频源没有功率散耗（微波源有）。

3) 射频加热更适用于大的（厚的）、平的材料（统一的功率和器型），而微波加热的多膜腔更适用于加热形状不规则产品。

4) 射频加热的频率选择范围更广以适应不同的情况。

5) 微波加热更适用于介电损耗因数较低且更适合应用于功率密度较高且不易击穿的材料（如电弧）。

10.2.5 电弧炉

1. 原理

电弧炉是利用电流（直流或交流）通过两电极间的电离气体时产生的电弧来加热材料的一种加热系统。这种电弧具有较高的能量，温度可达 4000℃，这样高的温度足以熔化钢、铁片或其他材料。这种电弧通常在熔炉中作为辐射热源或者埋弧使用。材料（charge）由流过该材料的电流和电弧的辐射能量共同加热。

2. 系统类型及应用^[3]

电弧加热系统有 3 种类型，分别是直接电弧炉（接触型）、间接电弧炉和埋弧炉。在第一种类型中，熔炉由一个水冷耐火器皿组成，这个器皿被伸入熔炉中的石墨或碳电极（通常为 3 个电极）的可伸缩顶棚覆盖。当电极和金属材料之间产生电弧时，电极和金属熔体表面的间距需要进行校准，以确保电弧长度恒定（电极磨损通过一个在操作期间将电极放入熔炉的定位系统来补偿）。

间接电弧炉有一个水平桶形钢壳，内衬耐火材料，电弧在待加热物体上方的两个碳电极之间产生。因为热量通过辐射从电弧传导至待熔化的金属，所以可能出现耐火材料过度加热以致超过其熔点的情况。

埋弧炉这种类型的电弧炉，其电极在熔炉的深处并且反应发生在电极的端部。

直接电弧炉主要应用在金属熔化的过程中，熔化的材料主要为废钢铁中大量的钢和铁，小型电弧炉主要的应用包括熔化钢铁和耐火金属。在铸造厂中，直接电弧炉通常用作生产铸造工业用的铁，包括对平板产品的连铸，例如钢板。

间接电弧炉通常用来生产合金（这些电弧炉一般比直接电弧炉小）。而埋弧炉用在生产合金的熔化过程，比如锰铁、电石、镍铁。

3. 优点与局限性

电弧炉的主要优点如下：

1) 拥有很大的生产能力（在大规模工业进程中，可以从废钢中提炼超过 400t 钢材），并且能承受很高的工作温度（最高达 4000℃）；

2) 直接电弧炉（就生产每吨钢铁的成本而言）比普通空气熔炉廉价；

3) 比普通空气炉或者集成高温炉更有效率；

4) 即使是由废钢铁提炼出的成品都具有良好的品质。

电弧炉的局限性主要是指耐火材料过度磨损和公共耦合点电能质量的负面影响

(主要是颤动、电压波动、谐波污染)。

4. 典型性能

1) 每吨的能源消耗在 400 ~ 500kWh 之间变动, 这取决于熔炉的生产能力 (大约只占普通空气熔炉或者集成高温炉消耗能量的 1/10 ~ 1/3);

2) 生产能力从小于 10t (铸造厂中这些熔化的钢铁用于铸造) 到大于 400t (在大规模工业生产中从废钢提炼钢材) 不等。

5. 应用注意事项

炼钢用的电弧炉通常建在有丰富且廉价电能供应的地方。

10.3 增加工业加热进程中能源效率的具体方法

在实际生产中, 提高工业加热进程中的能源效率可以通过以下方法实现:

1) 以现代电子技术取代传统技术 (燃料直接燃烧来加热空气、水等), 为所需应用选出最合适的技术;

2) 提高当前电子加热设备的效率;

3) 确保对工业电子加热设备进行适当的维修与操作。

10.3.1 更换传统加热技术

现代电子技术的主要优点 (从不同角度) 和替换旧技术的实际例子被进一步提出^[5,7]。

10.3.1.1 电阻和红外加热

电阻加热是最简单也是最传统的电子加热技术, 在高温和低温工业中都有应用。由于它的高效率、良好的可控性和快速升温能力 (特别对于直接加热而言), 电阻加热可以在许多应用中代替以燃料为基础的加热设备, 从熔化金属到加热食品都可以。

1. 能源效率/能源节约

现代间接电阻加热设备使用绝缘良好的外壳, 以先进材料为基础以达到减少热损失的目的, 从而这种技术比现有的其他加热设备具有更高的能源效率, 尤其在高温条件下 (例如, 电炉在最理想的情况下效率可达 95%, 而燃气炉最高接近 40% ~ 80%。实际上, 燃气炉真正的加热平均效率只有 15% ~ 20%)。

直接电阻加热和红外加热也同样具有较高的能源使用效率。随着新能源、材料和控制技术的出现, 这两种技术在众多生产部门中得以应用。在许多应用中, 电子红外系统协同许多对流式直接燃烧加热器使用。通常, 红外系统将产品预干燥, 而加工过程最终在对流炉中完成。例如, 汽车车身生产线利用红外系统将油漆快速喷在车身上, 然后车身进入对流炉中完成固化过程 (车身上快速喷涂消除了粉尘危害)。混合系统的另外一个优点是具有通过加快生产线速度来增加吞吐量的潜力。

2. 其他好处

(1) 环境方面

- 1) 没有燃烧产生的有害气体 (NO_x 、 SO_x 、 CO_x)、有害盐及金属排放;
- 2) 由于加热过程被精确控制, 所以没有热量传递到环境中去。

(2) 技术方面

- 1) 电阻加热设备可以有許多灵活的操作方式, 不需要大量空间 (特别是直接或红外加热);
- 2) 精确的温度控制和操作的可控性可以提高最终产品的质量;
- 3) 在电阻炉中熔化可以减少浮渣和材料损耗。

(3) 经济方面

- 1) 成本取决于设备的尺寸和类型, 和火力系统相似;
- 2) 资金回流大约需要两年 (对于高温间接和直接加热设备) 甚至更短 (对于红外加热系统);
- 3) 所需维护很少, 降低了经营成本。

10.3.1.2 介电加热

利用无线电波来加热材料的观念在 19 世纪后期才为人们所了解, 但工业应用为了在高频时产生高能已经开始依靠这一技术了。射频发生器在 20 世纪 30 年代得到长足发展, 而微波处理技术却是二战期间对雷达研究的产物。然而, 作为一种能够提高生产力、降低成本的技术, 人们对微波技术的兴趣在 80 年代显著提高。

目前在工业的各个领域都有许多成功的射频、微波处理应用。包括食品工业、橡胶工业、制药工业、聚合物、塑料工业和纺织工业。

1. 能源效率 / 能源节约

加热介电材料的常规办法就是在表面加热, 通过热传导的方式进一步将热量转移到内部 (过程十分缓慢, 因为这种材料是热的不良导体)。随着电磁场穿透这种材料, 出现了介电加热, 并且在加热过程中, 热传导加热越来越次要 (导致加热更快)。

因此, 加热过程从几小时缩短到几分钟, 在一定程度上由于时间的缩短, 介电加热节省了大量能量。另一个低能耗的原因是只有工件部分被加热 (在加热壁或炉内其他部分乃至炉内空气上均无能量损失), 另外在干燥或聚合过程中能量被选择性地吸收, 即只有工件内部潮气或粘合剂吸收提供的能量。

一般来讲, 介电加热的效率可达 65% ~ 75% (然而, 对于大多数实际应用, 效率在 50% ~ 70% 之间), 比较来说, 普通加热方法的效率只有 35% ~ 50%。因此介电加热通常比普通加热节约 15% ~ 40% 的能量。也有资料显示节约的能量在 25% ~ 50% 之间, 其高效是大批量制造并安装这种系统来代替普通系统 (比如空气、蒸汽加热) 的主要原因。

2. 其他好处

(1) 环境方面

1) 介电加热是环保的（将热传导至产品不需要媒介，而且在生产现场没有燃料燃烧）；

2) 电磁场被阻挡在加热腔内，所以这种技术不会对工人的健康造成影响，也不会对周围地区产生危害。

(2) 技术方面

1) 介电加热保证了高生产效率（因为节约了生产时间且加热过程可以快速开始或中断，使热量只消耗在加热过程中）；

2) 加热过程中温度可以被精确控制，提高了最终产品的质量；

3) 有时制造大批量不同产品介电加热是唯一的方法；

4) 与其他系统相比，介电加热的加热腔小，结构简单，可以进行更方便、快捷的维修。

(3) 经济方面

1) 因为产品质量很高，所以退货率很低；

2) 介电加热系统比类似的普通系统小很多（空间可以节约 50% ~90%）。

10.3.2 选择最合适的电子技术

综上所述，近来许多电子技术均可在各种工业加热过程中使用。然而，每一种技术都有自己的特点和工作性能。这就是某种特定的工业加热过程必须选择一种合适的电子技术的原因，以便从现代的技术优势获取最大的利益。

第一个例子如图 10.4 所示，数据明显体现出对于干燥过程，无论从能源消耗角度还是 CO₂ 排放角度，介电加热（本例中指微波加热）均比电阻加热更合适。

另一个例子是直接电阻焊接，本例中，电流被送到金属件接触点上，电阻中流过的电流产生热量熔化金属；当电流中断后，金属冷却使两个物体融合。在工厂中，用交流电的常规机器已经被一种新设备所取代，装备有现代的电力电子技术，后者可以使系统产生一个可控直流电流。这在最大程度上确保了节能（年度能源消耗的 64%）和更高的产品质量。表 10.6 给出了几种相对结果（产量 1320000 桶/年）。替换旧设备的花费不到两年就可以补偿回来，一个新的附加设备不到一年就可以补偿回来。

表 10.6 焊接系统能量耗费^[7]

参数	旧系统	新系统	两者差异
功率需求/kW	250	90	160
每年能耗/kWh	390323	140620	249700
能源成本/欧元	45503	16393	29110

10.3.3 现代电子技术设备效率的提高

一方面，设备需要不断地保养以维持所有电子加热系统的优良效率特性；另一

方面，新的电力电子设备、先进材料和新控制技术的工业运用使现行电子加热设备的初始性能得到提高。然而重要的是，电子加热设备所需维修次数（包括花费）总体上要少于传统加热技术。

接下来进一步阐述来自于参考文献 [2, 4, 8] 的几种状况。

10.3.3.1 电阻加热

对于以电阻为基础的加热系统，需要注意以下状况：

1) 为了能尽快发现并补充所有的热能损失（例如墙体裂缝），应不间断对炉体进行检查；

2) 维修事项要包括对加热电阻丝的清洁（清洁加热电阻丝可以提高热传导能力和加热效率）；

3) 对于高能直接电阻加热系统，通过实现减少不平衡的方法（例如 Steinmetz 电路），可以确保达到常规耦合中的抗干扰级别；

4) 控制系统的永久提升在技术和能源节约方面都有收益，并且优良的系统可以满足长时间准确温度的热能使用精确度。

10.3.3.2 红外加热

在这种情况下，应注意以下事项：

1) 现有的系统必须使用合适的材料（待加热产品吸收的光谱必须和红外源的发生光谱相匹配）。

2) 维修时要清理加热电阻丝，并且反射器、端盖和额外反射器一定要安装在炉内以减少能量损失，并使二次辐射的杂散红外能量回到产品上。

3) 由于红外板的移动，必须仔细考虑熔炉的外形以满足每一件待加热的工件的需求（对产品而言，适当的发射器定位，可以提高能源利用效率）。

4) 红外源分区也能提高能源效率，因为这确保了电能只消耗在限定的区域。这一办法对于不同尺寸工件在同一熔炉中加热的情况尤其重要。由于红外能量的可控制性（但是这需要一个更加复杂的操作系统），分区不但可以水平和垂直配置，还可以为特定的产品特定分配。

5) 高效率的操作系统也非常重要。除了提升分区能力外，一个高效的操作系统可以提供各种各样的操控而不是简单的开关控制，可以精确地向产品提供其所需要的辐射量，甚至是产品的尺寸、外形、颜色等都可以影响辐射量的多少。

根据参考文献 [3]，随着上述措施的采用，在现行熔炉中，又提升了 10% ~ 30% 的效率（意味着更低的损耗）。

10.3.3.3 感应加热

考虑到感应加热系统的灵活性，不同的操作区域可以采取不同的措施。

1. 熔化

1) 当需要高频或者中频时，稳态电源比旋转式发电机更加高效（稳态电源也可以适应不同频率操作且维修次数少）；

2) 需要经常检查炉内的耐火材料 (这有利于减少热能损失并且能够避免传感器故障);

3) 总线系统要尽可能短, 导体要根据操作频率的不同来选择;

4) 对于高导电性金属, 如铅、铜合金和镁, 沟道炉比坩埚炉更有效率;

5) 如果生产线和日程允许, 可以利用一个优化的熔化程序使两个熔炉共用一个电源;

6) 无盖坩埚熔化将多出近 30% 的能量损失;

7) 对于大功率工频炉, 必须采取措施 (例如 Steinmetz 电路) 以减少不平衡。

2. 加热和热处理

1) 通常加热和热处理系统需要高频, 比如之前提到的稳态电源十分适合这种情况。

2) 双频设计的优点: 在通常情况下, 低频用在总线有磁性的初始加热阶段, 而高频用在总线没有磁性的下一加热阶段。但是, 可以通过使用自动变频变换器来解决这一问题 (适用于以加热系统和 PFC 电容器组为代表的谐振频率电路, 并且允许在加热过程中修改参数)。

3) 对于无心系统, 推荐使用磁通集中器。这些无源器件为磁场提供一个包含路径, 使杂散磁场的损失减少了。

4) 为了提高效率, 电感器的配置一定要与待加热材料尽可能接近 (在许多工业应用中, 相同的线圈被用来生产许多不同的产品。实际上, 使用为某个产品特定设计的线圈可以提高 50% 的效率)。

5) 需要对所有现存缝隙 (在检查或工作中发现的) 进行屏蔽, 减少热损失。

10.3.3.4 介电加热

介电加热在现代工业中应用广泛, 需要考虑以下状况:

1. 微波加热

1) 涉及水蒸发的系统需要定时检查以防止水在加热腔沉积而造成危险;

2) 维修时必须对波导管和发动机工作环境及与加热进程相关的驱动器进行清洁;

3) 要周期性地对电磁场辐射进行屏蔽;

4) 无论待加热材料的特性何时变化 (例如宽度、深度或重量发生变化), 系统必须重置以保证效率, 并且要进行任何必要的修改;

5) 功率管寿命有限 (前面已述), 所以老化的发动机必须根据厂家的建议进行更换 (这将确保额定能源效率并减少系统故障率)。

2. 射频加热

1) 微波加热所提到的维修方式对射频加热同样适用 (这里一定要避免涂抹器中的水沉淀)。

2) 良好的操作系统可以提高能量效率和产品质量。

3) 要不断研究混合无线电频率 / 对流加热系统的使用：对流干燥器效率下降意味着材料含水量降低。在这一点上，无线电在除湿上更有效率。

10.3.3.5 电弧炉

电弧炉的数量比其他几种电子加热系统少一些。然而，由于现行加热设备的额定功率和其对电源的影响，专家对这些系统的精确操作特别注意。以下是一些注意事项：

1) 向电弧炉底部注入惰性气体（如氩）可以加速熔化过程中的热传导并加大残渣与金属间的相互作用（增加液态金属）；

2) 通常使用超高功率变压器，操作电炉可以带来超高功率和提高的生产率，并且减少能量损失。

3) 通常引入热回收系统，火炉的废热用来预热废钢，这样就节约了能量；

4) 先进材料可以用作辐射遮挡壁（例如低热质量的陶瓷材料来代替传统纤维陶瓷）；

5) 混合加热系统的实现可以确保一些优点：比如使用以燃料为基础的系统在加热第一部分，可以通过增加热传导率，减少热损失来节约能量；

6) 燃料气体的后燃烧优化得益于氧气和燃料的注入，燃气中的 CO 被氧化为 CO₂，而气体燃烧产生的热也可以帮助加热电炉中的钢；

7) 由于电力电子技术的发展，允许各种速度的驱动器在燃气扇中使用（这减少了热损失以及驱动系统自身的电能消耗）；

8) 维修时要特别注意电极的定位系统，因为电极定位系统在熔化过程中的精确度影响着能量效率和运行费用（电极警告）；

9) 常规耦合中（主要是颤动、电压波动和谐波污染）电能质量的负面影响一定要通过适当的方式补偿（谐波过滤、有源功率补偿等）。

参 考 文 献

- [1] U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy, *Energy Technology Solutions: Public-Private Partnerships Transforming Industry*, 2007, http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/itp_successes.pdf
- [2] K. Van Reusel *et al.*, Up to date arguments for selling electrotechnologies in Europe or how to use the political framework as evolved from the Kyoto agreement, *4th World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications*, Austin, TX, 2004, http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_1326.pdf.
- [3] U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy, *Improving Process Heating System Performance: A Sourcebook for Industry*, 2nd edn, 2007, http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/process_heating_sourcebook2.pdf
- [4] M. Ungureanu, M. Chindris and I. Lungu, *End Use of Electricity*, EDP, Bucharest, 2000.
- [5] CEA Technologies Inc. (CEATI), *Electrotechnologies. Energy Efficiency Reference Guide For Small to Medium Industries*, 2007, <http://cbookbrowsc.com/electrotechnologies-energy-efficiency-reference-guide-ceati-pdf-d177429937>
- [6] K. Van Reusel and R. Belmans, Technology bound and context bound motives for the industrial use of dielectric heating, *40th Annual Microwave Symposium Proceedings*, Boston, MA, 2006, pp. 15–18.
- [7] EURELECTRIC, *Electricity for More Efficiency, Electric Technologies and their Energy Savings Potential*, 2004, www.uie.org/webfm_send/5

- [8] N. Golovanov and I. Sora (eds), *Electrothermal Conversion and Electrotechnologies, Vol. I, Electrothermal Conversion*, Editura Tehnica, Bucharest, 1997.
- [9] A. C. Metaxas, *Foundations of Electroheat*, John Wiley & Sons Ltd, 1996.
- [10] D. Comsa, *Industrial Electroheating Installations*, Editura Tehnica, Bucharest, 1986.
- [11] S. Lupi *et al.*, Characteristics of installations for direct resistance heating of ferromagnetic bars of square cross-section, *International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing*, Hanover, 2008, pp. 43–49.
- [12] D. I. Romanov, *Direct Resistance Heating of Metals*, Mashinostrenie, Moscow, 1981.
- [13] J. Callebaut, Leonardo Energy Power Quality & Utilisation Guide. Section 7, Energy Efficiency. Infrared Heating, 2007, <http://www.leonardo-energy.org>
- [14] M. Orfeuil, *Electric Process Heating. Technologies. Equipment. Applications*, Battelle Press, 1987.
- [15] GH-IA-Induction-Heating-Guide, www.inductionatmospheres.com
- [16] J. Callebaut, Leonardo Energy Power Quality & Utilisation Guide. Section 7, Energy Efficiency. Induction Heating, 2007, <http://www.leonardo-energy.org>
- [17] J. Callebaut, Leonardo Energy Power Quality & Utilisation Guide. Section 7, Energy Efficiency. Dielectric Heating, 2007, <http://www.leonardo-energy.org>

深入阅读材料

- N. Anglani *et al.*, Energy Efficiency Technologies for Industry and Tertiary Sectors: the European Experience and Perspective for the Future, *IEEE Energy2030*, Atlanta, GA, 2008.
- R. Belmans, Energy-demand management, AIE Conference Building a Sustainable European Energy Market: Impact And Strategies For The Electrical Industry, Brussel, 2004, <http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/search.php>
- M. Chindris *et al.*, *Energy Management. Applications*, Casa Cartii de Stiinta, Cluj-Napoca, 2004&2009.
- International Energy Agency *World Energy Outlook 2006*, ISBN 92-64-10989-7, Paris, 2006.

第 11 章 HVAC

Roberto Villafáfila – Robles 和 Jaume Salom

暖通空调（HVAC）系统的设计目的是满足室内环境的各项需要，例如，通过加热或者制冷室内环境来改善空气温度、湿度和空气质量。HVAC 系统在工业和建筑行业是能源需求的一个重要部分，正如有关数据表明的，这种系统在建筑物中消耗大部分能量，其消耗量接近总能量消耗的 50%^[1]。

HVAC 系统是能量链的一部分，使用不同的能源进行空气调节，并将其转换成热能，以满足所需的舒适度（见图 11.1）。HVAC 系统使用化石燃料和电能；化石燃料是最常见的加热源，而电能几乎是制冷的唯一能源来源。除了制冷，电能也用于促进 HVAC 系统中的流体循环以使其热能到达需要的场所。

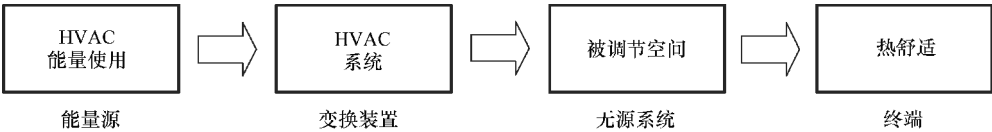


图 11.1 传递热舒适的能量流图^[2]

在 HVAC 系统中，用于热能的产生和传输过程中的风机和泵是主要的电能消耗部件，它们都是由电动机驱动的，其能量效率与所使用的电力电子驱动器的功率有关，这些内容主要包含在第 9 章中。除了优化这些电气设备的能耗，从整体上降低 HVAC 系统的能耗也具有很大的节能潜力，制热器和制冷器也一样。上述节能的实现可以通过无源的方法降低热能需求和使用可再生能源提供制暖和制冷。本章主要涉及节能措施，以减少 HVAC 系统的热能需求，实现更高的能效比。

热传导是 HVAC 系统实现加热或制冷功能的基础。这种传导通过一组热交换器（蒸发器和冷凝器）实现，热交换器可以独立工作，也可以是制冷或制热装置的一部分。热交换过程是应用热力学来研究的。

本章首先回顾 HVAC 系统与热力学方面有关的基本概念，尤其侧重于制冷方面。HVAC 系统广泛应用于各种活动及场合，因为不同的应用场合对热能有不同的需求。其次，本章描述了用来定义室内条件的参数。

HVAC 系统包括一系列设备、分布式网络和终端，这些终端可以一起或单独为空间传输热能。它们工作时相互影响，使得对能量平衡的评估成为一项复杂的工作。之后，本章描述了一些最常见的 HVAC 系统，并且分析了其中涉及的能量转换。

最后，本章列出了图 11.1 中能量流的每一环节的能量效率措施，这些措施大

部分都着眼于降低能量的需求，即热需求，从而减少所消耗的总能量。

11.1 基本概念

众所周知，热量自然而然地从热区流向冷区，这样的热传导不需要能量。因此，换热器、蒸发器和冷凝器都是比较简单的设备，通常由两种在不同温度下的流体流过的两个不同的回路组成。较热流体的热量转移到较冷的流体，经过这样的传输，热流体温度降低同时冷流体温度增加。

然而，逆过程不能自发地实现：它需要使用一种称为冷冻机的热交换设备。一般来讲，热交换设备是一种循环运行的设备，从一个区域吸收热量，然后将其释放到另一个区域。通常使用一种流体（称为制冷剂）作为介质来实现循环过程中的热传导。

如图 11.2a 所示，冷冻机工作是一个蒸气压缩的过程。流体（制冷剂）以蒸气的形态进入压缩机，被压缩到压力与冷凝器的压力相同，此时流体的温度很高。当它流经冷凝器，随着将自身的热量传输给热的环境，开始冷却和冷凝。然后它到达膨胀阀，由于膨胀阀的节流效应，其压力和温度都急剧下降。这样在低温下，它进入蒸发器并蒸发，同时从空间吸热制冷。当流体再次离开蒸发器并流入压缩机后，完成整个循环。

冷冻机用来减少制冷空间的热量 Q_L ，为了实现这一目的，就需要外力做功，即 W_{net} 。冷冻机的效率是以性能系数（COP）表示的，具体含义为有用的热传递与输入总功之比：

$$\text{COP}_{\text{refrigeration}} = \frac{Q_L}{W_{\text{net}}} \quad (11.1)$$

为避免混淆，冷冻机的工作能力用 $\text{COP}_{\text{refrigeration}}$ 表示，它可以有一个大于 1 的值，因为从冷冻机中转移的热量可以大于工作输入。

热泵是与冷冻机有着相似循环的另一种设备，可以将热能从低温区域转移到高温区域（见图 11.2b）。但热泵的目的是给某一空间制热，它通过从冷的环境中吸收热量，并转移那部分热量到所需的空间来实现这一目标。

热泵的工作能力，根据式（11.2）所示 COP 来表示，它也可以有大于 1 的值。一个典型的 $\text{COP}_{\text{heating}}$ 值是在 2 ~ 3 之间的。在寒冷的环境中，如果温度太低， $\text{COP}_{\text{heating}}$ 低于 1。在这样的情况下，热泵将其操作模式改为电加热。

$$\text{COP}_{\text{heating}} = \frac{Q_H}{W_{\text{net}}} \quad (11.2)$$

现代热泵配备有适当的控制和换向阀，使它们能够实现冬季取暖和夏季制冷。对于其他热力学的资料，读者可以参考参考文献[3]。

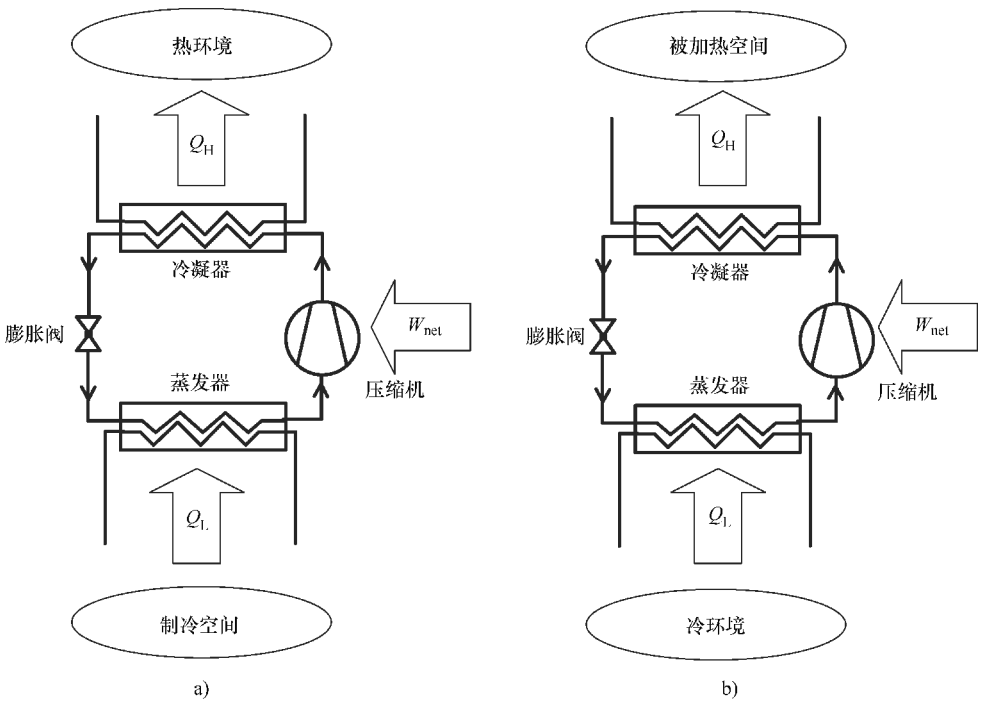


图 11.2 冷冻机和热泵
a) 冷冻机 b) 热泵

11.2 环境热舒适度

楼宇能耗主要取决于室内环境的需求，并且室内环境也影响居住者的健康、行为和舒适度。人们普遍估计，在经济发达的国家，人们至少有 80% 的时间是在室内（在单位、在家、在学校或在上下班时所乘公交车里）。这表明，室内环境质量（IEQ）可以对人有重要影响，用于加热和制冷目的的能量消耗也一样。为了努力保持 IEQ，楼宇被机械地调节以便提供恒定、统一、“舒适”的环境。最近修订的国际标准已经更新了设计和评估楼宇中“舒适”的定义。这些修订是基于在世界范围内施行的研究成果上作出的，表明在非空调楼宇用所谓的自适应方法描述舒适条件更好。有差异的自适应方法在楼宇的设计、建设和运营方式上相互作用，尤其是当以低能耗建筑和零能耗建筑物（NZEB）为宗旨的时候。零能耗建筑物是配备光伏系统的高性能建筑，每年利用现场可再生资源产生能量，以补偿每年的能量消耗。然而，如果在理论上支持可持续发展的环境友好型建筑的设计，那么当提高 IEQ 时，必须满足对能源效率的要求。

IEQ 应解决 4 个方面的内容：IEQ、热环境、照明和声学性能。所有这些都是

相互关联的,对健康、舒适度和性能都有相应的影响。对于“健康”的理解非常广泛,包括完整的生理、心理和社会幸福感的状态等,而不仅仅是没有疾病的状态。“舒适度”表示对环境的满意。“性能”或叫生产能力,是关系到能否执行艰巨任务的能力。健康、舒适度和性能可能会受到生理、行为因素或社会组织变量的影响,而不仅仅是 IEQ 条件。虽然光线和声音是室内环境的重要组成部分,但是这里不对它们进行深入探讨。

影响热舒适最重要的变量是空气的温度、平均辐射温度、空气的相对速度、相对湿度(或空气中的含水量)、人们的活动类型(这决定了在体内产生的热量)和着装(提供人体和环境之间热传递的热阻)。在 20 世纪 70 年代,Fanger^[4]进行的研究主要是在良好、可控的环境中进行的,该研究结果部分已经被采用并被写入国际标准,其中,热舒适被定义为“表达对热环境满意程度的精神状况,可以用主观的评价进行评估”。

热条件会影响身体健康,在极其炎热的天气条件下的死亡率可以说明这一点。在不太极端的条件下,温度升高与典型病态建筑综合症(SBS)的发病率增加有关。同时一些研究表明,建筑物中的温度保持在较低的热舒适水平是有益的。

热环境可以通过几种机制影响人们的行为或工作。太热或太冷(热不适)这些不愉快的感觉使人们不能专心工作并影响他们的幸福感,这可能会导致注意力和工作动力下降。处在这样的状态下其结果通常是生产能力降低。Seppanen 等人(2006)^[5]证明温度提高到 20~23℃将使生产效率提高,而温度高于 23~24℃时生产能力降低,最大生产效率预测发生在温度为 21.6℃时。这些数据是在办公环境、工厂、现场实验室及学校教室内获得的。然而,其他的研究和调查表明,如果可以影响自己的环境,人们接受更广泛的温度和湿度变化范围,特别是有可开合的窗户时^[6]。最近的一些工程,如 ThermoCo 工程^[7]分析了自适应舒适型温度上限值的楼宇中住户的满意度,结果表明需要进一步扩大调查研究的规模,特别是炎热(欧洲)气候条件下的情况。

IAQ 是描述室内环境特征的一个重要参数,与楼宇居住者的健康有很大的关系,IAQ 可以被定义为室内空气中的杂物/污染物的水平。通风系统的运行和性能直接决定了室内空间的 IAQ。此外,空气的流动和建筑物内的过道对居住者的热舒适度有重要的影响,尤其是在夏季,众所周知,速度为 1.5m/s 的微速空气就能改善适度活动的热舒适度。

因此,热舒适度的期望和通风对建筑物节能性能的影响是十分巨大的。当室外新鲜空气供给增加,冷却或加热的系统处于运行状态时,相应的能量需求也增加。另一方面,一些节能策略,如楼宇中的自然冷却操作和自然通风的利用,如果室内温度舒适度可以自适应调节,这些策略就变得容易多了。

最近的研究结果表明,当执行基于自适应理论的可变的室内舒适温度标准时,可能会产生显著的节能效果^[8]。在地中海气候住宅建筑中可以节省高达 18%~

34% 的能量。

最近明确规定室内热环境因素和个人因素结合，并提出大多数居民都接受的热环境条件的标准是 ANSI/ASHRAE Standard 55 - 2010 和 EN - 15251 - 2007。这两种标准都提出了可接受的温度范围，而这实际上取决于提供舒适环境的系统的类型。欧洲 EN - 15251 标准规定了解决室内空气质量、照明和声学性能问题的设计参数，而不只是热环境的设计参数。

标准 AHSRAE 62.1 用于确定高性能建筑的最小通风要求。新鲜空气的最小空气交换率被定义为居住密度和空调区域表面的一个函数。表 11.1 作为一个例子描述了这种比率。

所需的通风是将另外的两个需求相加的结果。该标准允许所需新鲜空气在数量上的变化，取决于居住水平或者其他条件。

表 11.1 楼宇空气交换率的需求

类型	每个人的需求/ ($L/s/人$)	每单位表面的需求/ ($L/s \cdot m^2$)
办公室	2.5	0.3
居民区	2.5	0.3
教室	3.8	0.3
饭店	3.8	0.9

根据 EN - 15251，几个标准用于新鲜的空气比率的定义。其中两个方法与 ASHRAE 62.1 记载的方法一致，同时考虑用于稀释由住户和建筑排放的污染物的通风设备。这个标准根据不满意的人所占的百分比，将建筑物分为 3 类（I、II 和 III），表 11.2 给出了 3 个类别的推荐值。

关于通风系统的控制，在建筑内没有人的时候，通风量可以减少到最低值（非住宅楼宇为 $0.1 \sim 0.2 L/s \cdot m^2$ ，住宅楼宇为 $0.05 \sim 0.1 L/s \cdot m^2$ ）。

在进行制暖和制冷系统的设计时要考虑热舒适性，EN - 15251 将提供机械制冷系统的建筑 and 没有提供机械制冷系统的建筑进行区分。对于设有机械空调系统的建筑物，确定热舒适的标准基于 Fanger 方法和 PMV - PPD（预测人们不满的平均投票百分比）指数。ASHRAE 55 标准提出了类似的对比，并建议典型的应用范围为 $PPD < 10$ 和 $PMV (-0.5 < PMV < 0.5)$ 。表 11.3 列出了系数值。

EN - 15251 标准允许无机械制冷的楼宇使用自适应模型。根据定义，“无机械制冷建筑物”在标准中定义为“没有任何机械冷却并且在温暖的季节也不依靠其他技术（如中等大小的窗口、合适的阳光屏蔽层、利用建筑群、自然通风、夜间通风等）来降低室内高温的楼宇”。机械制冷被定义为“通过机械手段对室内环境制冷、提供送风冷却、风机盘管冷却、表面冷却等。”自适应模型可以应用到配备

了面向户外可操作并且可以很容易地被住户打开和调整的窗户的空间，这种空间没有机械通风冷却操作。非空调的机械通风可以使用（在夏天），但窗口的打开和关闭应作为一种首要的调节空间热条件的手段。此外，有可能有其他的个别控制室内环境采用低能耗的方法，如风扇、百叶窗、夜间通风等。

表 11.2 根据 EN - 15251 标准获得新鲜空气的推荐值

每单位表面空气流动/ (L/s · m ²)				
类型	人引起的 空气流动	微污染 的建筑	低污染 的建筑	污染 建筑
I	10	0.5	1	2
II	7	0.35	0.7	1.4
III	4	0.2	0.4	0.8

表 11.3 热舒适对应的 PPD 与 PMV 系数值

类型	PPD	PMV
ASHRAE 55	<10	-0.5 < PMV < 0.5
EN - 15251 - I	<6	-0.2 < PMV < 0.2
EN - 15251 - II	<10	-0.5 < PMV < 0.5
EN - 15251 - III	<15	-0.7 < PMV < 0.7

ASHRAE 55 标准也有类似的区别，但不会有完全相同的措辞，允许自适应模型的应用（基于室外每月平均温度），“居住者控制的自然调节空间”被定义为“那些场所的空间热条件主要由居住者通过打开和关闭窗口来调节”。

总的来说，自适应模型的应用表明，对比应用 Fanger 模型，自适应模型可以在更宽的温度范围内实现室内热舒适。图 11.3 所示 EN - 15251 标准的温度界限值应该用于衡量防止夏季过热的无源方式，并且是平均环境温度的函数。当自适应温度界限值（上限）不能被无源方式保证时，应使用机械制冷建筑物的设计标准。参考文献 [5] 表明，使用 EN - 15251 所提出的一些系数，其预期用途（从其自适应变量开始，如果不能满足所选类型的舒适条件，就切换到 Fanger 变量）意味着过程存在不连续性。

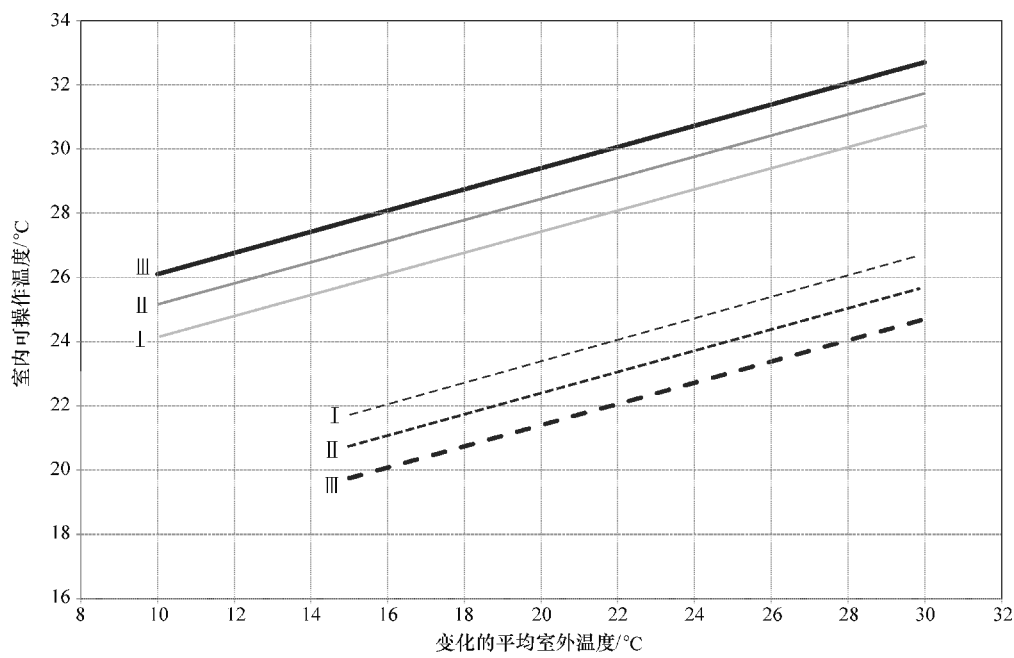


图 11.3 无机械制冷系统作为室外空气每天变化的平均温度（根据 EN - 15251 标准）
功能的可接受室内操作的温度范围（寒冷季节）

11.3 HVAC 系统

HVAC 系统的服务涵盖了空气流通、温度控制和湿度控制。为了满足室内环境的要求，对于通风和空调的需求有很大的不同。因此，存在多种 HVAC 系统。根据它们提供这些服务的能力，HVAC 可分为 5 个服务等级（见表 11.4）。

HVAC 系统包含了大量的组件，包括制冷和制热设备、空气处理单元（AHU）、管路和终端。服务要求越多，系统就越复杂。

加热技术，包括锅炉、熔炉和供暖机组，它们通常消耗化石燃料。冷却技术，包括冷水机组、冷却塔和空调设备，它们通常消耗电能。压缩系统，使用天然气或其他冷却系统，如吸收式制冷机，吸收式制冷机或者除湿系统是电动式冷水机组的替代品。配电网包括空气处理机组、风机、水泵，主要消耗电能。

楼宇最常用的 HVAC 系统是全空气和全水系统，将在下面介绍这些内容。这样的系统在参考文献 [9] 中可以找到一个更广泛的概述。

当制冷成为最主要的需求时，全气系统通常会被运用。图 11.4 显示了常见的全空气系统组件的配置，它有一个锅炉制热并有一个水冷机组连接到冷却塔制冷。在这样的系统中，室外空气进入 AHU，其包括一个风扇、清洁空气的过滤器、空

气热交换器和加湿器（如果需要的话）。空调空气通过 AHU 后，会被空气管网输送到需要的空间，还有一排并行回风管道输送用过的气体。

表 11.4 热舒适服务质量的分类^[1]

服务等级	通风	制热	制冷	加湿	除湿
SL0	√				
SL1	√	√			
SL2	√		√		
SL3	√	√	√		
SL4	√	√	√	√	
SL5	√	√	√	√	√

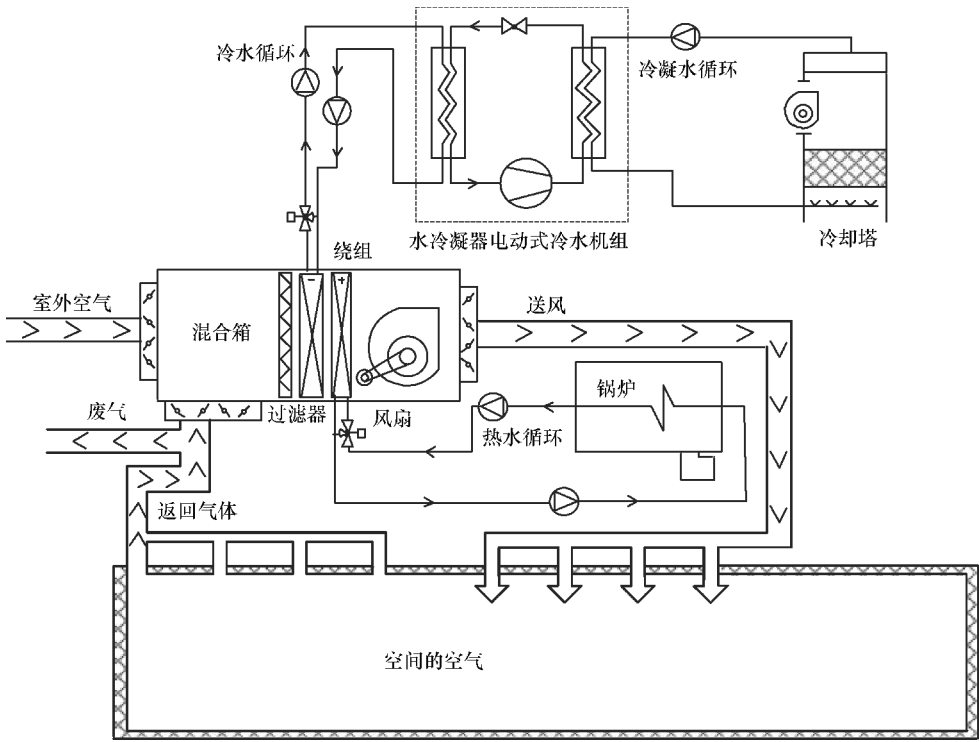


图 11.4 具有产生冷水和热水功能的全空气 HVAC 系统典型组成结构

大部分的全空气系统有单风道系统，可对空调空间提供加热或制冷。HVAC 单风道系统可以分为以下 4 种：

- 1) 单区系统是最简单的全气系统，因为它们对整套设施提供一个恒定体积并且相同温度的空气。它们十分常用，例如在百货公司、工厂和礼堂。
- 2) 不同区域中的变风量（VAV）系统允许人们单独控制温度。它们被广泛应

用于大型建筑物中。

3) 为了对每个区域单独进行空调控制,可以对前两个系统增加线圈,以实现再加热。它们被用于有精确湿度要求的场所,如博物馆和一些工业过程。

4) 多区域系统有一个专用的管道直接连接到独立的为每个区域提供空调空气的空气处理机组(AHU)。但它们几乎已经过时,只是在小区域和管道距离较短的小型建筑中存在。

除了普遍的单风道系统,还有单独管道分别作加热和冷却目的的双管系统。两个配电网络并行运行并且每个区域中空气在各自的混合箱中混合,它们被用于对温度和湿度有严格要求的楼宇中。HVAC 双管系统可分为恒风量(CAV)系统和VAV系统。

在加热和制冷系统中,无论哪个阶段,水都比空气更适合传递热能。然而,空气质量由于受湿度影响而不易控制。配水管道系统可以由一个管道形成,连接回路中的所有终端单元;也可以通过两个管道形成,一个提供每个终端单元热能,另一个作回流;甚至通过4个管道形成,一个提供热水,另一个提供冷水,另外两个作为回流。全水 HVAC 系统可分类如下:

1) 自然对流是最简单的全水 HVAC 系统。它采用液体循环对流器。

2) 辐射供暖系统可以采用电阻加热或燃烧作为热源。低温系统可以被安装在地板上,而中温系统安装在面板上。

3) 风机盘管系统是单一空间的小型空气处理单元,连接线圈以提供热水和/或冷水。风扇吹送空气通过线圈调节空间。如果它有一个外部的入口,就被称为单元通风机。

所有已被描述的系统通常可划归为中央空调系统,由于制热和制冷是集中的,这种系统适用于大型楼宇。然而,小一点的系统也可用于相同的目的,尽管它们的作用区域是有限的。热泵就是一个可以提供加热和冷却功能的一体化终端空调系统的例子。相反,取暖器只能传递热量,如风扇强制取暖器和高温红外加热器。

11.3.1 能源转换

HVAC 系统包括了大量相互连接的元件和子系统,整个能量转换的过程十分复杂。对 HVAC 循环^[1,10]能量交换过程的描述有利于评估这些过程中涉及的每个转换的能量以及能量平衡状态。

图 11.5 和图 11.6 代表全空气 HVAC 系统,图 11.4 通过 HVAC 循环展示。图 11.5a 描绘了在制热模式下通过 3 个回路的热能链(如果使用锅炉):

1) 燃烧回路:在锅炉中由燃烧的燃料产生的热量。

2) 热水回路:水在锅炉中被加热,并在线圈中被冷却,水通过泵驱动。

3) 空气回路:热量被传递到空调空间,空气由风扇驱动。

图 11.5b 还描绘了在制热模式下 4 个回路(如果使用的热泵)的能量链。在这种情况下,它们具体如下:

- 1) 取热回路：从环境中提取的热传递到蒸发器。蒸气由风扇驱动。
- 2) 制冷剂回路：制冷剂工作于蒸气压缩循环中，从蒸发器中提取热量，并将其转移到冷凝水中。制冷剂由压缩机驱动。
- 3) 热水回路：水在冷凝器中被加热，并在加热线圈中被冷却。水通过泵驱动。
- 4) 热提取回路：加热线圈的热量被传输到空调空间。空气由风扇驱动。

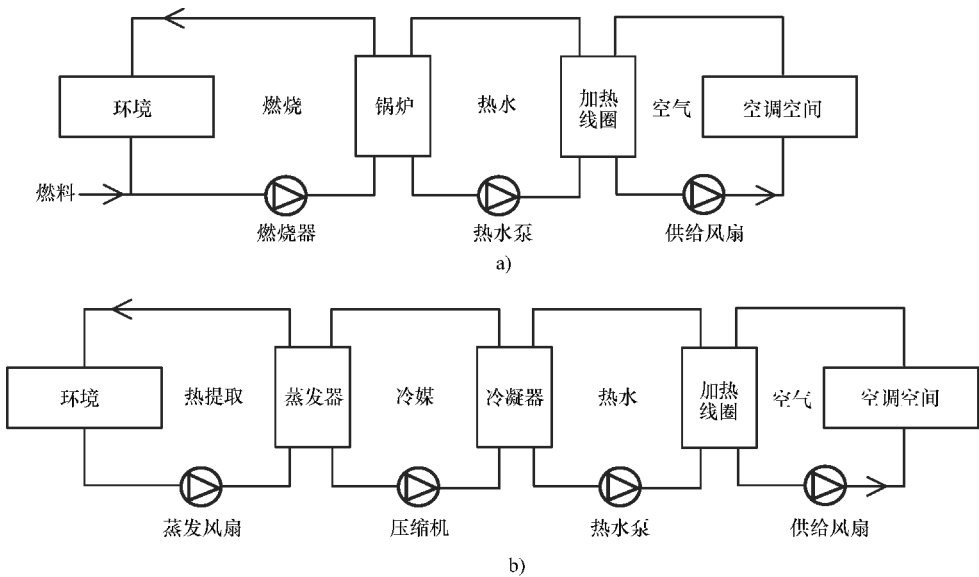


图 11.5 HVAC 制热过程的热能链
a) 热水锅炉 b) 气-水热泵

包含 5 个回路的冷却模式如图 11.6 所示：

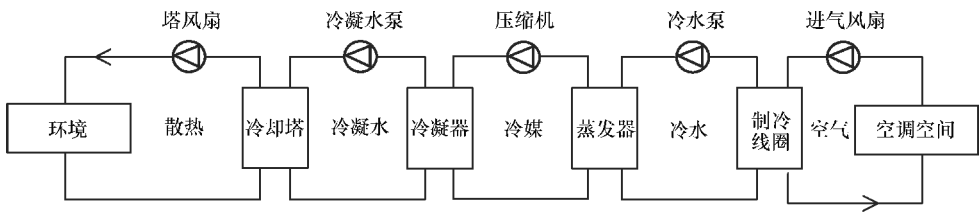


图 11.6 HVAC 制冷过程的热能链

- 1) 空气回路：从空调空间提取的热能传递给冷水。风扇驱动空气通过管道，然后它通过冷却盘管以产生热传递。
- 2) 冷水回路：冷水在整流罩线圈中被加热，在冷水机组蒸发器中被冷却。冷水由泵驱动。

- 3) 制冷剂回路：制冷剂工作于蒸汽压缩循环时，从蒸发器中抽取热量，并将其转移到冷凝水中。制冷剂由压缩机驱动。
- 4) 冷凝水回路：热量从冷凝器中被传送到冷却塔。水通过泵驱动。
- 5) 散热回路：热量在冷却塔中被释放到环境中。

在 HVAC 系统中，液动元件（泵和风机）和热/冷发生器（冷水机组、锅炉、热泵、火炉等）需要能量来工作。然而连接到热回路中的热交换设备（水盘管、蒸发器和冷凝器）不消耗任何能量，因为热传导是由温差引起的。

11.3.2 能量平衡

一个 HVAC 系统通常由 4 个主要的子系统组成：制暖、制冷、水循环、气循环。图 11.7 显示了这些子系统的能量平衡，其中 Q 是指热负荷、 L 是指功损耗、 C 是指消耗能量^[1]。

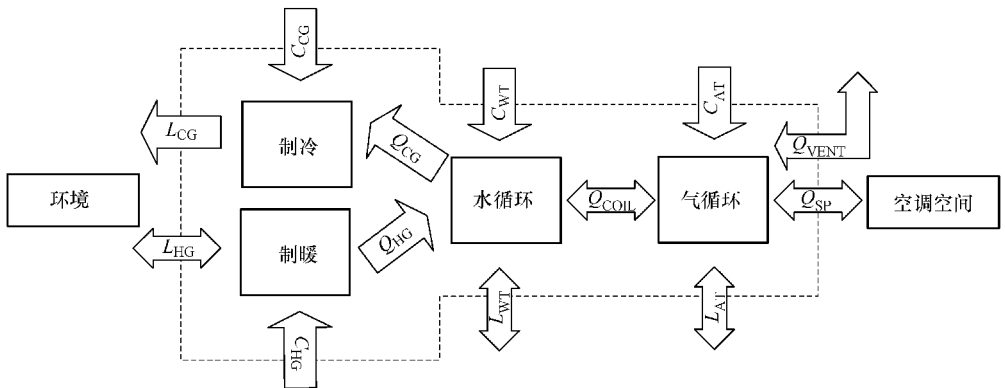


图 11.7 HVAC 子系统的能量平衡

制暖（HG）使用外部能源提供能量来为水和空气加热。在锅炉和火炉中，未充分燃烧的燃料、排放的气体和墙壁散热都会导致能量的损失。在热泵中，这种损失表现在蒸发器从环境中吸收能量。这个子系统能量平衡是： $C_{HG} = Q_{HG} + L_{HG}$ 。

制冷（CG）需要消耗能量（ C_{CG} ），用于除去水或空气传输系统中的热量（ Q_{CG} ，通常通过线圈， Q_{COIL} ）。能量损失（ L_{CG} ）是指由冷却子系统散失到环境中的能量，包括用在制冷压缩过程的泵和风机、空气冷却装置和水冷装置的泵和风机、气冷装置和水冷装置。这个子系统能量平衡是： $C_{CQ} = Q_{CG} + L_{CG}$ 。

水循环（WT）子系统使用外部能源（ C_{WT} ）的能量驱动水通过发生装置到水盘管泵之间的管道。发生子系统和水之间的热交换，被称为主负荷（ Q_{PRI} ）。如果它是正则意味着制暖，如果它是负则意味着制冷。能量损失（ L_{WT} ）发生在泵送过程中的低效率、水的损失以及在水分布网络的热量损失中。因此，该子系统的能量平衡是： $Q_{PRI} = Q_{COIL} + L_{WT} - C_{WT}$ 。

气循环 (AT) 子系统使用外部源 (C_{AT}) 供给的能量驱动将空调气体 (Q_{SP}) 经风管从水盘管送到空调空间的风机。考虑到在回风和排风中包含能量 (Q_{VEN})，风机也用于通风。能量损失 (L_{AT}) 主要由风机的效率低下、空气泄漏或渗透、空气分配网络中的热损失等导致。因此，该子系统的能量平衡是： $Q_{COIL} = Q_{SP} + Q_{VEN} - C_{AT} + L_{AT}$ 。

11.3.3 能源效率

HVAC 系统最终的能源消耗还要受它所安装在的建筑物影响。环境参数在设计阶段必须考虑，比如要安装的设备、在液体输送子系统的泄漏和渗透、根据建筑物要求而安装的控制系统以及其他一些因素。

这样一个系统的能源效率差异很大程度上取决于它所提供的服务。此外，建立一个能源效率指数以比较其与其他系统的性能是相当困难的，通过相对能量效率，HVAC 系统间的对比就很容易了。

本章提到的空调系统相对能量效率如图 11.8 所示，可以看出，CAV 双管道 HVAC 系统比其他的 HVAC 系统相对效率要低。另一方面，单独的装置，热泵和对流加热器是相比较而言最高效的 HVAC 系统。针对每个应用最合适的系统可以参考参考文献 [9]。

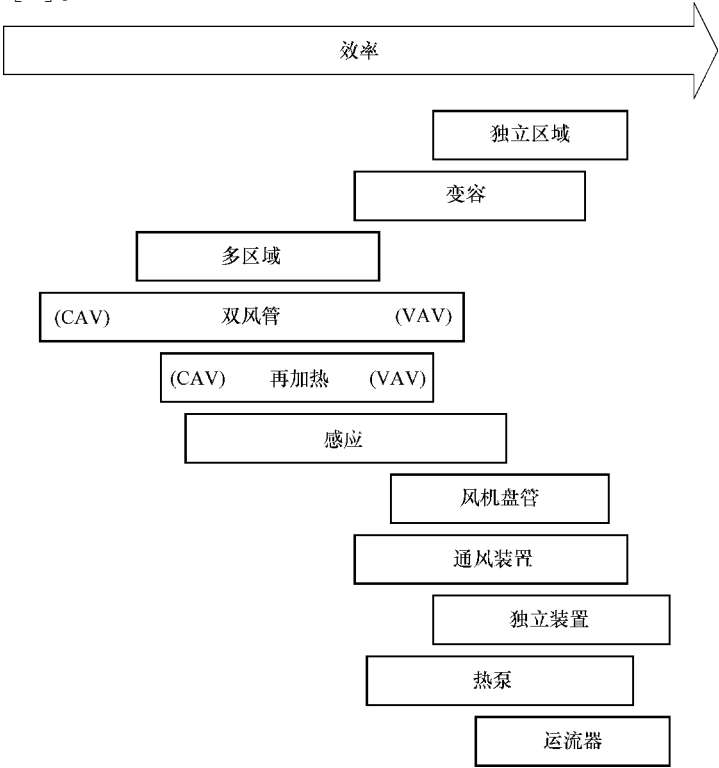


图 11.8 HVAC 系统的相对能源效率^[11]

11.4 HVAC 系统的能源效率措施

HVAC 系统的能量效率可以在 HVAC 能源链（见图 11.1）中的每一个阶段进行处理。通过对能源链中的任一组件的技术改造都能使系统的整体效率得到改善。

1) 终端服务：通过 HVAC 的能源政策对通风率和室内舒适条件设立限制，以促进合理利用能源。

2) 无源系统：为了达到低能耗标准的需求，以高绝缘、良好气密性和热回收通风系统标准设计包络线。

3) 转换设备：减少热发电机和流体驱动的消耗，它们的损耗源于能源浪费和设备的低效率。化石燃料是最常见的加热源，而电能几乎是独一无二的冷却制冷源。此外，电能被用于运输子系统和辅助设备如阀门驱动器。使用太阳能光热系统和集成化建筑设计方法减少供暖需求可以节省能源。

4) 能源：为了减少外部能源的需要，可以利用采光、自然通风、自然冷却、被动散热、热泵和来自可再生能源现场的热或电。

由于能源链的存在，当采用某个措施后，整个链都会受到影响。因此，主要的问题将在后面进行深入描述。

11.4.1 终端服务

全球对减少能源的使用和它对环境的影响的关注已经导致了在不同的行业促进能源效率的法律和标准产生。HVAC 系统的能源消耗在建筑行业中占据一个重要部分，这样的系统在相应的能源法规中有一个专门部分规定，其他与能源消耗有关的系统如照明和建筑外保温也一样有相应规定。由于一整栋楼在协调不同服务（如 HVAC 系统）中能量管理的复杂性，以及气候和施工方式的重要性，无论是在质量还是在数量方面，对 HVAC 的能效要求都是多种多样的。在参考文献[12]中含有各国能源法规对楼宇中 HVAC 系统的要求。

11.4.2 被动方法

本节对被动策略和考虑的因素做一个简短的列表和说明。这些措施的目的是为了减少建筑物的能源需求和提高用户对环境质量指数（IEQ）要求的满意度。

11.4.2.1 当地的气候条件

为了能够充分利用当地的气候，分析所在地的气候类型是至关重要的。第一项任务是整理相关的气候数据（温度、湿度、太阳辐射、风力等），这有助于合适的战略设计。建筑物所处的地理位置是首要因素，但位置条件有显著区别，并且将影响设计。

11.4.2.2 场地规划

建筑物的选址可能会受到与环境或城市环境有关的一些外部因素影响，这些因素可以慢慢地改变当地环境，形成一个小气候，小气候主要受当地地形、城市化和

植被影响。利用植被作为生态气候措施具有不同的效果：一方面，它能够改善城市中建筑物周围的空气质量和环境，这有利于人们健康和舒适；另一方面，从能量的角度来看，依据气象站战略配置制造阴凉的落叶树木，同时也可以帮助防风。对城市建筑物最为重要的是，城市文脉（context）的特征对直接接受太阳辐射、周围建筑的阴影、风和空气的流动有很大的影响，同时使空气温度增加，形成“热岛”效应。对于市区用地的情况，要考虑的一些方面应该是：建筑物的形状（ L ， H ， I 等）、高度、街道的宽度和开放空间或后院有无。

11.4.2.3 方位

建筑物的朝向要考虑阳光入射路径和风向。应用不同朝向的方案直接影响到楼宇的设计。对于线性建筑，考虑太阳的方位，最佳的布置是延东西轴向，这样东西外墙开口最小。正面外观容易获取太阳辐射可以提高采光和在冬季减少热需求。在炎热的气候或者在夏季，合适的阴凉保护系统将有助于减少南立面制冷负荷，且不会在一年中其他时段失去了太阳辐射的好处。此外，在炎热的季节如果我们想要给建筑物降温，楼宇的方向非常重要，因为它使人们能够利用主要方向的风并最大化自然通风的效果。另一方面，方向和立面设计在冬季可以帮助保护楼宇免受寒风。

11.4.2.4 建筑规划部分

建筑规划的部分和形式，对建筑和环境之间潜在的相互作用的确定是有影响的。其中的关键环节是建筑物的形状，这决定它的容量。容量与建筑物表面体积有关，这是外在的。紧凑的外形通过建筑外墙最大限度地减少热损失，但使得它很难从中获得自然资源，如太阳辐射或风。内部空间的规划和布局取决于计划用途（大厅、办公室、卧室、客厅、服务区等），这将对节能和舒适性能有影响。例如，在当住宅用的情况下，内部规划让对门间空气便于自然交叉通风。缓冲空间，这是偶尔使用的空间，可以作为热缓冲器。这些缓冲地带，如天井、冬季花园、阁楼等可以提高建筑物的节能性能。

11.4.2.5 外墙

对于楼宇的外墙，为了减少热量或冷气负荷，有几种策略可以运用。绝热保温是避免热损失的主要方式。建筑法规建议取最大的 U 值墙壁和玻璃的最大比率 [也称为 WWR（窗口到墙的比率）]，以尽量减少织物的热损失。 U 值是衡量通过建筑构件的热损失率的一个标准。除了绝缘水平或窗口的百分比，其他重要方面如外墙的不透明部分必须加以考虑。其中一些方面是结构类型和墙中绝缘层的位置，这会影响到楼宇的热质量和它的热性能。垂直墙壁应慎重对待，屋顶和地板也一样，特别是在它们与无空调的空间或地面接触的情况下。热桥也增加了热损失。虽然不可能建一座没有热桥的房子，但是合适的壁式结构可以将热损失减少到最低限度。墙的外表面的特征与它的太阳吸光率或反射率有关，这直接影响到墙壁对太阳辐射的吸收或反射的量。提高楼宇的气密性，例如更好的窗户，有助于控制从外部渗透进来不需要的空气。另一个重要方面是窗户的特点或门面的透明元素。就楼宇

的位置、类型（住宅、写字楼、学校等）和遮阳设备而言，窗墙比应该优化。它们是两个关键数字，定义透明元素的热行为：一个是 U 值；另一个是 SHGC（太阳能热增益系数，也称为 g 值）。窗口的 U 值比不透明元素的大。如果以减少热损失为主要目标或者需要有一个高的 WWR， U 值应减少到一定程度。SHGC 是测量入射窗户表面并通过窗户进入室内空间的热增益比率。当我们需要建筑物防晒或较好的隔离性能时，采用不同 SHGC 和 U 值的窗户就能实现：例如防晒玻璃、单层/双重/三重玻璃窗、充满气体的釉质系统、低辐射窗户等。

11.4.2.6 太阳防护

安装在外墙的高透明物质朝南，在冬季的几个月可吸收大量的太阳热量，但也可能会导致夏季太热。为了控制辐射，主要是太阳辐射，应考虑装设遮阳装置。遮阳装置可以是固定的也可以是移动的，其设计应该根据开口的方向并考虑直射方向或者一年中不同时间和一天中不同时间的太阳辐射。防晒设备应该有合适的安装尺寸，这样在冬季的几个月入射的太阳辐射不会受到影响。

11.4.2.7 自然通风

通风是一种提供新鲜空气的方法，可以充分确保室内空气质量。一栋楼的所有空间应该有足够通风，以去除平常使用过程中所产生的污染物。自然通风是提供足够新鲜空气的一种手段，所以它是机械通风系统的一种替代物，而且不需要电力操作。此外，自然通风可以增加居住者的热舒适度，提供室内空间的空气流动，可以驱散建筑物中的热而不使用空调。夏季或中间季节使用的策略之一是夜间通风。新鲜的空气更新了里面的热空气同时也冷却了楼宇（见图 11.9）。地面通风是通过一个埋在地下几米的空气炉热交换器给楼宇供给空气的一种策略。由于外部地表的 2m 或 3m 以下温度相对稳定，这种技术可以在冬季预热空气或在夏季冷却空气。

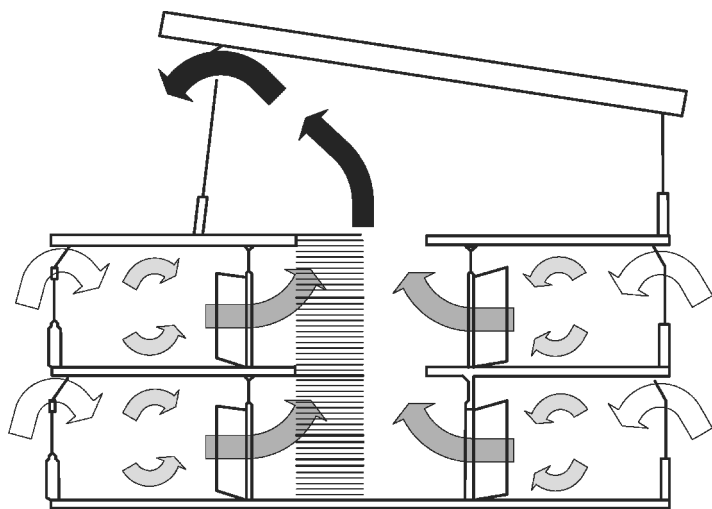


图 11.9 夏季晚上自然通风

11.4.3 变换装置

如果高效的设备用在所有 4 个子系统, HVAC 系统可以提高其效率, 尤其是空气传输、水传输、制冷和制热的效率。这些子系统的主要组成是热交换器、风机和泵。当系统工作时, 由于它们的连续工作, 就获得了一个提高能源利用效率的机会。

一方面, 热交换器(线圈、蒸发器和冷凝器)负责从发生器向空调空间转移热量或冷气。虽然它们不消耗能量, 但是通过增加其传送区域可以提高它们的效率。

另一方面, 风扇和泵是由电动机驱动的使流体(空气、水、制冷剂)流动设备。如果这样的电动机通过变频变换器(VFC)馈送, 风机和泵会更高效, 因为它们可以根据需求调整它们的性能, 避免了低效的通断操作。第 9 章提供了解决方案的优势更深入的解释。相反, 作为 VFC 的电力电子器件, 它们可能会在其操作期间引起谐波, 这可能会影响设备的效率。通过参考文献[13], 可以进一步理解该电能质量方面的问题。

在传输子系统通过减少热损失和防止加热与冷却子系统同时进行也可以节能, 这可以通过系统变参数的自动控制实现。在 HVAC 系统运用能量管理控制系统(EMCS)使系统作为一个整体从而进行有效的管理。例如, 大型楼宇的 HVAC 系统覆盖不同的区域, 这些区域可能有不同的热需求。为了对每个区域提供独立的热供应或提取, EMCS 是基石。

EMCS 的核心是一种基于计算机的程序, 从传感器获得的数据进行处理后用于监测、控制和优化 HVAC 系统, 同时达到高的舒适性和高效能。前面描述的对设备和系统随着设备的使用通过能量的节约可以迅速收回投资。

EMCS 的应用并不限于 HVAC, 其包括一套经由通信网络连接的硬件设备和软件。硬件包括:

- 1) 用于获得该系统的主要可变参数的传感器, 即温度、湿度、压力、气流和水。
- 2) 执行器通过控制装置执行动作, 这样的执行器通常是电气驱动装置。
- 3) 控制设备依据从传感器中获得的数据控制执行器工作, 这些数据通过植入这些设备中的算法进行处理。这样的控制, 由直接数字控制器实现, 例如可编程序逻辑控制器(PLC), 可能还需要一些辅助装置(如继电器)与执行器进行交互。
- 4) 当系统工作的时候, 能量计量装置允许能量消耗。

该软件包括监控与数据采集(SCADA)系统和数据存储。整个 HVAC 系统所消耗的能量由 SCADA 系统监测, 这允许对系统进行监督, 以及对控制策略运行的良好性进行评估。此外, 与楼宇的其他系统的协调也要考虑, 例如在发生火灾的情况下阻止空气流通以方便灭火的消防系统。HVAC 的控制可以参考参考文献[14]。

硬件设备和软件之间的通信链路可以根据不同标准的通信协议(BACnet、

LonWorks、Modbus、DeviceNet、Ethernet、TCP/IP 等), 可以用无线也可以用有线 (其中包括双绞线、电力线载波线 - PLC 和光纤) 进行连接。为了保证互操作性, 通常也需要网关, 即所有的设备之间数据的交换。

11.4.4 能源

HVAC 系统的能源需求与它所工作的楼宇有关。楼宇是一个非常复杂的能源系统, 其中大量的物理现象以动态的方式进行交互。楼宇的建筑性能取决于它的位置, 主要但不是唯一地由气候条件和其内部可能会进行的活动类型决定。

好的楼宇设计方法可以提供给居住者很高的舒适度。使用集成能源设计可以使不可再生资源的使用率达到很小。有许多举措一直都在尝试如改善建筑规范^[15,16]、为工厂电力设计提供指导^[17]、改进设计工具^[18,19]、提高最终用户寻求低能耗建筑甚至零能耗建筑的意识^[17]。

综合能源设计方法, 顾名思义, 就是一个包容性的方法, 旨在探寻设计过程中的所有设计团队成员以及业主、项目经理、维护代表、委托人等的参与。另外关键是要将建筑物作为一整个具有很强关系的复杂系统来考虑。低能耗建筑的综合能源设计有 3 个重要原则: ①节能措施; ②高效节能系统; ③可再生能源系统。任何能源建筑/工程的成功在很大程度上取决于根据建筑类型、用途、位置、气候环境条件 (包括可再生资源的可用性)、当地能源基础设施和金融资源等条件如何解决这 3 个问题。图 11.10 给出了综合能源设计 (IED) 的 3 个重要原则: 无源方法 (PA)、高效节能系统 (EES) 和可再生能源系统 (RES)。IED 过程中的第一项原则着重于通过无源方式减少所需的能量。基于固有人工照明和可能的加热和/或冷却需要, 第二个原则是采用 EES。第三个原则是通过 RES 补充照明、供暖和制冷的能源需求。

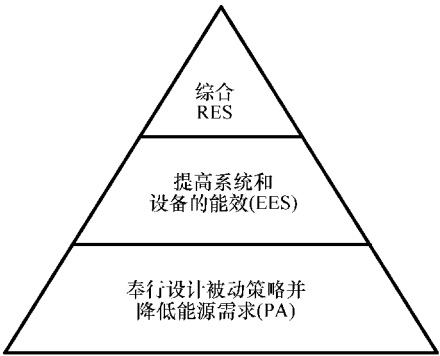


图 11.10 IED 原理

HVAC 设计师将意识到任何无源加热和冷却策略在设计初期就应提出。同样, 从可再生能源获得的提供预加热和/或预制冷的每千瓦能对 HVAC 设备的尺寸有重大影响。通过综合设计, HVAC 工程师可以提出一些便于无源策略实施的建筑特点, 这些要求将影响建筑围护结构的设计。在设计期间, 可再生能源的成本效益也会被 HVAC 工程师加以考虑。可再生能源整合通常被视为一个可选的设计特征, 但是当其包含在整个建筑模拟分析中时, 它有可能补偿大部分加热和制冷负荷。因此, 一个低能耗或几乎为 0 的建筑的 HVAC 设计是整合设计方法的一部分, 该方法重点强调被动策略, 是把可再生能源作为一种减少峰值负荷的手段, 进而减少 HVAC 设备尺寸。

参 考 文 献

- [1] L. Perez-Lombard, J. Ortiz and I. R. Maestre, The map of energy flow in HVAC systems, *Applied Energy*, **88**(12), 2011, pp. 5020–5031.
- [2] L. Pagliano and P. Zangheri, Comfort models and cooling of buildings in the Mediterranean zone, *Advances in Building Energy Research*, **4**, 2010, pp. 167–200.
- [3] M. J. Moran and H. N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 5th Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [4] P. O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, Mc Graw-Hill, New York, 1970.
- [5] I. Sartori, J. Candanedo, S. Geier, R. Lollini, F. Garde, A. Athienitis and L. Pagliano, Comfort and energy efficiency recommendations for net zero energy buildings, *Eurosun 2010 Conference*, March 2010.
- [6] *Transsolar Climate Engineering, High Comfort Low Impact*, FMO Publishers, Germany, 2009.
- [7] ThermoCo Project, Thermal comfort in buildings with low-energy cooling – Establishing an annex for EPBD-related CEN-standards for buildings with high energy efficiency and good indoor environment, Intelligent Energy – Europe (IEE), www.thermoco.org, 2009.
- [8] M. Santamouris, Adaptive thermal comfort and ventilation, Ventilation information paper No. 12, *INIVE EEIG*, 2006.
- [9] *ASHRAE Handbook: HVAC Applications*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 1995.
- [10] L. Lu, W. Cai, Y. Soh Chai and L. Xie, Global optimization for overall HVAC systems. Part I problem formulation and analysis, *Energy Conversion & Management*, August 2004.
- [11] W. C. Turner and S. Doty, *Energy Management Handbook*, 6th edn, CRC Press, 2007.
- [12] L. Perez-Lombard, J. Ortiz, J. F. Coronel and I. R. Maestre, A review of HVAC systems requirements in building energy regulations, *Energy and Buildings*, **43**(2–3), 2011, pp. 255–268.
- [13] A. Baghini, *Handbook of Power Quality*, Wiley, 2008.
- [14] R. Montgomery and R. McDowall, *Fundamentals of HVAC Control Systems*, ASHRAE, Elsevier Science, IP edn, 2008.
- [15] E. Cubi and J. Salom, Consistency in building energy performance evaluation systems: a review and discussion, *International Journal of Construction Project Management*, **3**(3), 2011, pp. 1–16.
- [16] EPBD (recast). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
- [17] IEA SHC Task 40, ECBCS Annex 52: *Towards Net Zero Energy Solar Buildings*, <http://www.ica-shc.org/task40/index.html>
- [18] EnergyPlus Energy Simulation Software, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>
- [19] TRNSYS, *The Transient Energy Simulation Tool*, www.trnsys.com

深入阅读材料

- ASHRAE Handbook: Systems and Equipment*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 1992.
- IEE, Intelligent Energy Europe programme, <http://ec.europa.eu/energy/intelligent>
- EU-Project, *CommonCense*, <http://www.commoncense.info>
- D. Mumovic and M. Santamouris, *A Handbook of Sustainable Building Design & Engineering, An integrated approach to Energy, Health and Operational Performance*, Earthscan, 2009.
- O. Seppänen, and W. J. Fisk, Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health, *Proceedings of Indoor Air 2005*, Beijing, China, 2005, pp. 40–53.

第 12 章 数 据 中 心

Angelo Baggini 和 Franco Bua

一个数据中心可以消耗多达 100 ~ 200 倍标准办公室所消耗的电能，由于其能耗如此之大，因此它们是高能效设计措施的首要目标，这样可以节省资金并减少电能的使用。

然而，数据中心所要求的可靠性和高功率密度使得许多设计标准远远超过了能源效率的标准。

因此，设计一种高效节能的数据中心需要创意、技术和投资，如果设计合理，它可以获得可观的效益。制定一个全面的策略和数据中心管理办法显得尤为重要。这种方法应具有可靠、经济、实用和环保的特点。

设计一个数据中心应考虑 3 个主要因素如下：

- 1) 可靠性，可以用备用设备来保证的特征；
- 2) 稳定性，通过使用模块化组件实现，模块化组件允许随着时间推移而改变的环境而调整，避免不必要的过大的尺寸；
- 3) 选择高效组件。

在选择每个组件的时候，这些特征必须加以考虑：是否是 IT 设备、电力供应基础设施的组件或者 HVAC 系统的一部分。

12.1 标准

目前各种关于绿色数据中心的主题活动正在进行标准化。本节将概述这一领域的主要措施。

对于一般的数据中心标准化，ANSI/TIA - 942: 2005 举办了关于“电信基础设施”领域的第一场会议，会议提供了一些关键的定义，其中一些内容与能源效率有关。美国 BICSI 现在进行的工作是制定一个以 ANSI/TIA - 942 标准为基础并扩展其内容的数据中心标准。

国际标准化组织 (ISO) 和国际电工委员会 (IEC) 正在通过 ISO - IEC - JTC 1 研究这一主题。这个联合工作组确定将数据中心的能源效率作为行业内一个重要主题并建立一个研究小组调查数据中心的能源效率 (EEDC)，调查标准化市场需求，开始与有关财团对话，并确定 JTC 1 可能的工作项目。

电信界与欧洲电信标准协会 (ETSI) 公布了一系列题为“宽带部署 - 能源效

率和关键绩效指标”的文件，其中 ETSI TS 105174 - 2 - 2 专门针对运营商数据中心。

欧洲电工技术标准化委员会（CENELEC）已成立一个特别工作组，讨论潜在的标准化数据中心内的有关能源效率的行动。这个工作组（CLC BTWG132 - 2）已审阅由欧盟委员会完成的与数据中心能源效率有关的工作，并将其作为 CENELEC 标准主体。BTWG 132 - 2 被推荐给欧洲标准委员会（CEN）、CENELEC 和 ETSI，它们建立了一个联合 CEN - CLC - ETSI 的小组，管理和协调欧洲在这一领域的活动。

在 CENELEC 框架内更具体地说，TC 215 已经着手 EN 50600 标准系列的工作，用来处理设备和基础设施，以支持数据中心内电信电缆和设备有效操作。在其他的问题上，这些标准有具体说明：

- 1) 相关测量参数的方法可以用于确定能源效率；
- 2) 基础设施有必要使那些参数能够被测量。

提到事实上的标准化，最主要的工业论坛是“Green Grid™（绿色电网）”，对目的是提高数据中心的资源效率的最终用户、政策制定者、技术提供商、设备建筑师和公用事业公司来说，它是一个开放的工业企业集团。此外，在这个领域，欧盟委员会 DG - JRC 制定了一个旨在提高数据中心的能源效率的自愿加入的“数据中心的行為守则”，同时包括一个关注最佳实践的重要文件。

12.2 消耗概况

实现数据中心高能源效率的一个基本步骤是对其组成设备消耗的测量或估计。

对于一个新的数据中心，最好是在设计阶段估计其能源消耗，使选择的设备尽可能正确。很多时候，数据中心设置在楼宇内，不完全是专门为它服务。因此，如果没有安装用于此目的的电能表，检测一个数据中心的能源消耗就不那么容易。

除了总的能源消耗，通过各种能量流并将它们与各个区域或一件单一的设备相关联以及了解和监控数据中心的能量如何分布也很重要。

这样，不仅可以确定那些具有最高能量消耗的设备的方位，还可以确定哪些功能不是很必要的，甚至可以被关断或处于暂停状态的设备。

这是一个很耗时的评估，需要进行大量的测量，但对建立数据中心的能量图来说它相当关键，而且是基础。

一个典型的数据中心的能量平衡可以分为 3 个主要部分：动力、制冷和 IT 设备（见图 12.1 和图 12.2）。IT 设备的消耗大约占数据中心消耗总能量的一半，数据中心消耗的总能量也涵盖了 HVAC 和辅助系统消耗的能量（如消防安全、干扰等）。

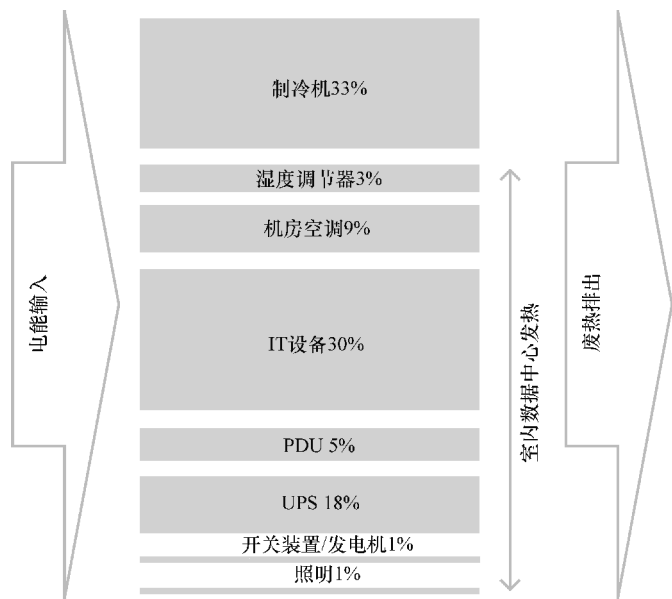


图 12.1 典型的数据中心能量平衡（绿色电网中的数据的详细说明）

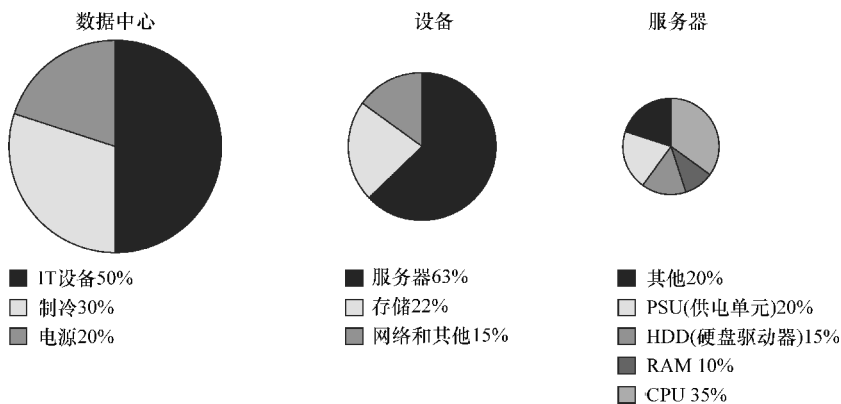


图 12.2 单一的数据中心组件的典型值（详细数据来自 ENEA）

IT 系统所使用的能量被转换成热量，因此必须散热。提高这些装置的效率则意味着直接减少能量消耗，同时减少冷却的耗能（约 1/3 的总能量）。

12.2.1 能源性能指标

数据中心能源效率的评估是一项复杂的操作。原则上，效率的计算应基于已完成的有用功，但它很难有一个标准衡量数据中心的有用功。

国际上，Green Grid™ 提出了一项性能指标：PUE（电力使用效率）和它的反 DCIE（数据中心基础设施效率）。这些指标最初基于电功率（kW）的测量，现在

的趋势是从这些指标转向其他基于能量 (kWh) 的测量。在 2010 年年初, 4 类 PUE 被定义: 零、一、二、三, 取决于是否涉及功率或能量, 且取决于在哪儿做的测量。

第一个被定义的 PUE 零是指由数据中心消耗的总电功率和 IT 设备所消耗的电功率之比; 理论上理想值为 1, 但是 1.5 也被认为是不错的。

现有的数据中心的平均值约为 2.5, 这表明有一个显著的改善空间, 同时也意味着一个提高能效的机会。

12.3 IT 基础设施与设备

IT 设备可以认为是一个数据中心的最终用户, 然而只能在足够的电力供应和有效的冷却基础上才能确保正常工作。电力系统必须确保电力的持续性和质量, 而冷却基础设施必须消除 IT 设备产生的热量, 以避免过热, 过热会对固定资产产生危害, 甚至对设备造成永久性的破坏。

数据中心 IT 设备的选择不只是考虑 IT 设备性能, 如运算速度, 当考虑能源效率时, 与吸收功 (OPS/W) 相关的每秒指示操作也应该加以考虑。这是, SPEC (标准性能评估公司) 计算 IT 设备市场基准的一个指标。

选择高效的 IT 设备可以带来间接的好处: 较低的产热和减少对电力的需求, 以确保质量和服务的连续性。

分类并标明最高效 IT 设备的自愿计划在本次选择中也起作用。“能源之星 (Energy Star)” 是对于服务器、个人电脑、台式机、显示器和打印机的最热门的能源效率计划, 而 80 PLUS 计划用于供电设备。

12.3.1 刀片式服务器

刀片式服务器 (Blade Server) 是一个特定类型的服务器, 包括高度集中的计算机组件 (CPU、RAM、存储器等) 共享辅助组件 (电源和风扇)。

这种类型的服务器可以引入到新的机架, 或者可以取代老式服务器。例如, 14 台刀片式服务器占据 7 个老式服务器的空间。因此, 该解决方案可消除老式服务器单元, 并且以刀片类型替代它们, 刀片式服务器被认为是高密度和高性能计算组件。在较小的空间增加计算功率将导致每单位面积的热量大量增加, 每架高达 28kW, 因此需要提供特殊的冷却系统。与传统的设备相比, 用相同的计算功率, 这种类型的服务器总体上节约了约 10% 的能量。

12.3.2 存储器

与传统的 HDD 相比, 固态存储器 (SSD, 固态硬盘) 不仅可以提高能效, 还在数据存储速度上有优势。

SSD 拥有更低的功耗, 同时产生的热量更少。存储系统中数据选择的速度通过每秒输入和输出操作的次数来衡量。对于 HDD, 如果转速为 15000r/min, 可能达

到 300 IOPS，而 SSD 可以达到每单位 30000 IOPS。为了和 SSD 有相同的速度，则需要 100 个 HDD。

根据 Sun/Oracle 公司估计，SSD IOPS/W 的比值是 10000 左右，而在 HDD 的情况下，它约为 20。如图 12.3 所示，在相同 HDD 的 IOPS 下消耗约为 500 倍。

与传统 HDD 相比，成本高仍然是阻碍 SSD 大量使用的原因，尽管这种差异会在未来减少。

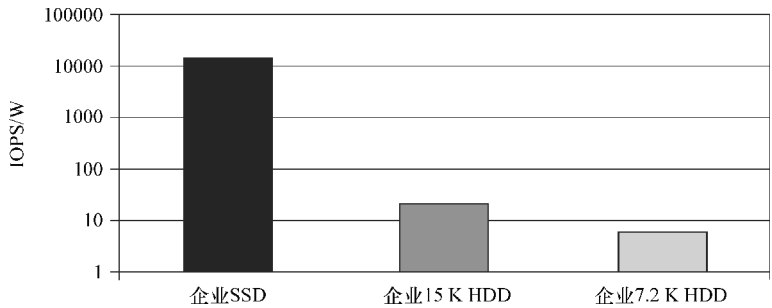


图 12.3 不同存储系统的 IOPS/W 的比较

12.3.3 网络设备

新一代的网络设备每单位功率承载更大的吞吐量，当网络需求变化时，积极的能量管理措施也可以应用以减少能源消耗。这些措施包括空闲状态逻辑、门数优化、内存访问算法，减少输入/输出缓存区等。

不断提高的峰值数据传输速率导致对能量需求的急剧增加，增加的能量用来持续传输少量数据。根据当前传输的数据的量快速切换以太网的传输速度可以使以太网的能效大幅提高。

12.3.4 整合

对于现有的数据中心，用新机替换旧机的可能性应予以考虑。

处理器和内存的微积分性能飞速发展，据英特尔公司的估计，每 4 年它能够以最新型完全取代所有的机器并且能源消耗也会随之降低。

比如一个 2009 年的机架可以把 9 个 2005 年的机架整合，同时让能源需求减少至 1/10。

服务器的整合可以通过多种方式实现，两种典型的方式如下：

- 1) 将应用程序合并到一台服务器与一个单一的操作系统；
- 2) 在虚拟机上虚拟化应用程序工作负荷并由虚拟机管理程序管理它们。

整合也可以应用于物理层。实际上，当很多设备具有类似的热负荷密度并且温度要求近似时，可以将它们集中安装于由风扇和更高效的冷却系统冷却的数据中心。如果为这些设备单独提供温、湿度要求严格的独立环境，将会增加空调系统的负担。

这个概念通常可以扩大到一般的数据设备。通过把多个数据中心集中到一个区域，而不是几个地点的方式，把未充分利用的数据中心空间整合到一个集中的位

置,这样可以使数据中心效率度量更加容易。

12.3.5 虚拟化

虚拟化是一种整合的形式,不仅可以应用到服务器,而且还可以应用到其他组件或应用程序,如桌面、存储、应用程序和网络虚拟化。

虚拟化是一种资源整合技术,不仅服务器可以虚拟化,其他部件如桌面、存储、应用及网络都可以虚拟化。

服务器虚拟化使过去需要一个独立的物理服务器来完成的工作现在整合为一个服务器就能完成。通过减少物理服务器的数量,节约了能源使用。这些应用被放在具有很强计算能力的一台服务器或几台服务器阵列上。

虚拟化是一个提供了节约更多能源的工具,可以让一个可用的机器发挥最大的潜能。此技术允许几个“虚拟服务器”,在一个物理服务器中,可以有多个操作系统,里面运行着不同的服务。因此,采用特定的软件后,其硬件的性能可以被最大化。

这种措施将显著地降低能源消耗,因为它允许一些较短投资回收期机器的整合。但由于与被虚拟化系统的配置相关,因此能耗的节约难以量化。

虚拟化最大限度地发挥服务器潜力的同时,也导致在房间内形成热区。因此,有时候有必要对包含虚拟机的服务器提供适当的冷却系统。

采用虚拟化的主要好处包括:

- 1) 更大的灵活性;
- 2) 更好的管理流程;
- 3) 减少机器的数量;
- 4) 降低运营成本(电力和冷却);
- 5) 数据中心有更多可用空间。

12.3.6 软件

数据处理软件的选择对能源效率也有影响。在某些情况下,软件执行相同操作需要不同的CPU百分比使用率。在数据中心的很多操作是很有竞争力的,因为它的软件往往需要更少的CPU占用。实现相同的功能需要更少的能量,可获得更有趣的结果。

因此,在实施不同的应用、选取不同的软件时,针对不同的处理器、内存和其他服务器资源做评估是比较明智的,特别是当计算结果没有大的差异的时候。

12.4 设备基础设施

12.4.1 电力设备基础设施

IT设备需要连续和高品质的电源。如果供电系统质量差,则可能损坏设备或影响其运行。

供电系统中的主要设备如下：

- 1) UPS（不间断电源）；
- 2) PDU（配电单元）；
- 3) PSU（供电单元）；
- 4) 电缆。

12.4.1.1 UPS

UPS 的选择必须确保用户免受电源扰动和供电不连续性的影响，还要有高的效率。

静态 UPS 由整流器、逆变器和蓄电池组成。整流器将交流电变换为直流电，并对蓄电池充电。而逆变器则用于将直流电变换为交流电。

静态 UPS 可以有 3 种不同的架构：

1) 双转换：在正常模式下的操作，负荷由一个变换器/逆变器的组合通过双变换技术连续地供电，即 AC - DC 和 DC - AC。

2) 在线交互式：在正常模式下的操作中，负荷通过交流输入和 UPS 逆变器的并联连接供电。逆变器用来提供稳定的输出电压调节并为电池充电。输出频率取决于交流输入频率。

3) 被动待机：在一个正常的操作中，负荷由交流输入主电源通过 UPS 开关供给能量。可添加额外的设备作为电压稳定系统的电源调节。输出频率依赖于交流输入频率。当交流输入电源电压超出 UPS 预设的范围，UPS 将进入一个能量储存模式的操作中，此时逆变器被激活，负荷被直接或通过 UPS 开关（它可以是电子的或机电的）直接连接到逆变器上。

评估一个静态 UPS 的能源效率最合适的操作模式是双转换（也称为联机），它能保证完整的保护，防止电源干扰。

每个 UPS 容量的大小是根据负荷来决定的，由于容量与负荷最大值接近，因此它的效率一般是最大的。

对最新一代的 UPS，尽管在负荷减小时效率更加恒定，但趋势是使用模块化组，这可以更加适应环境和负荷变化的要求以确保最高的效率。

在转换中丢失的能量会转化为热能，这些热能被 HVAC 系统提取，这意味着更高的效率带来更少的冷却要求，并且也意味着降低运营成本。

动态或飞轮 UPS 具有相同的静态功能，一般的情况下安装不需要蓄电池，然而在这种情况下，为了提供超过 10 ~ 15s 左右的连续供电，它们必须加上发电机组，否则它只能对瞬态和短期干扰提供保护。

这种类型的 UPS 由飞轮构成，飞轮高速旋转积累动能，当电压扰动发生时动能转化为电能。当飞轮 UPS 装上蓄电池，它的使用寿命会延长，因为飞轮减少了蓄电池充电/放电的次数。

动态 UPS 的特点是效率高，在 96% ~ 97%。它们还具有的优点是对环境条件

的要求比静态 UPS 的限制少，还可能具有减少对空调需求的优点。

当选择 UPS 类型时，现场电网的特性必须加以考虑：对于极少有扰动的电网可以采用旁路模式的 UPS，可以高效率地工作；如果电网扰动的频率很高而且扰动的时间限制在几秒之内，那么带有飞轮的 UPS 是比较适合的。

当选择 UPS 时，除了要考虑到每个安装现场的特点外，还要进行产品生命周期成本分析，包括冷却成本、维修成本等。

12.4.1.2 PDU

PDU 具有给数据中心各种最终用户分配能量的功能。虽然它没有很高的能源消耗，但也不应该被忽视，因为这些消耗最终会变成热量，成为空调系统的负荷。

在设计阶段，它的位置选择非常重要，因为它影响电力电缆线路；事实上，电力电缆最好是以一个有序的方式放置，以便维护，并且避免妨碍冷却空气通过。它们通常安装在机柜的后部、固定在地板或天花板上。

可取的做法是选择配备了可以测量所连接设备瞬时功耗仪器的 PDU，它允许对系统进行监测。

12.4.1.3 PSU

大多数数据中心设备使用内部或机架安装式 AC - DC 电源。从以往的经验来看，一个典型的机架式服务器的电源将交流电变换成直流电效率为 60% ~ 70%。现在，通过使用较高质量的元件和先进的工程，这有可能使供电效率高达 95%。

使用高效率电源，将直接降低数据中心的电费，并间接降低冷却系统的成本以及解决机架过热的问题。

目前有几个认证计划将实行标准化电源效率，例如自愿计划 80PLUS，标明具有较高效率水平的电源，可以在选择过程中起帮助作用。

12.4.1.4 照明

在为数据中心设计电气系统时，照明也应予以考虑。数据中心不是一直被占用，因此不需要在一年所有的时间全光照。

仔细选择高效照明布局、灯和镇流器不仅会减少照明电气使用，也减少冷却系统上的负荷。

因此，建议使用最高效的照明技术，例如 LED，结合基于占用传感器的自动控制系统区。

12.4.2 HVAC 基础设施

HVAC 系统的设计必须根据实际的 IT 和电气设备负荷，尽量避免尽可能多的不必要的过尺寸，并确保高可靠性。

考虑的主要参数如下：

- 1) 所有设备产生并需消散的总热量；
- 2) 要消散热能的空间分布以“热点”识别；
- 3) 冷却系统的使用；

4) IT 设备的工作温度。

适当的热负荷和空调系统的软件仿真，可以支持设计师的工作。计算流体动力学（CFD）对移动空气流的学习可能是非常有用的。

如果在数据中心的某些部位的热负荷与其他部位明显不同，这些单独区域和/或单独的系统则需要不同的冷却系统。

一个高效率的 HVAC 系统的主要技术特点如下：

- 1) 连续监测温度和湿度；
- 2) 基于 IT 设备的实际要求优化控制系统；
- 3) 高效率的空调系统部件，其中值得一提的是：
 - ① 高效率电动机、水泵和风机变速驱动器，
 - ② 使用自由冷却系统，
 - ③ 高 EER（能效比）式冷水机组。

12.4.2.1 制冷最佳实现

低密度房间

IT 设备的冷却由来自高架地板或天花板的冷空气流保证。冷空气由空调机组 CRAC（机房空调）提供，位于房间的任意一侧，或者是集中式系统。

在这种情况下，减少或消除提供给设备的冷空气和设备释放出来的热空气的混合非常重要。为了分开两个气流，可以建立热空气通道，或者建立冷空气通道。通道处设置进气口。为了确保不出现冷、热空气的混合，热通道或冷通道可以完全封闭，可以安装合适的仪表盘监测其流动。

为了使通道完全隔离，可以设计一系列的通风管道，并在 CRAC 开设出气口使热空气可以回到那里。当每个机柜的热耗散功率超过 3 ~ 4kW 时（见图 12.4），这种冷却系统就不够用了。

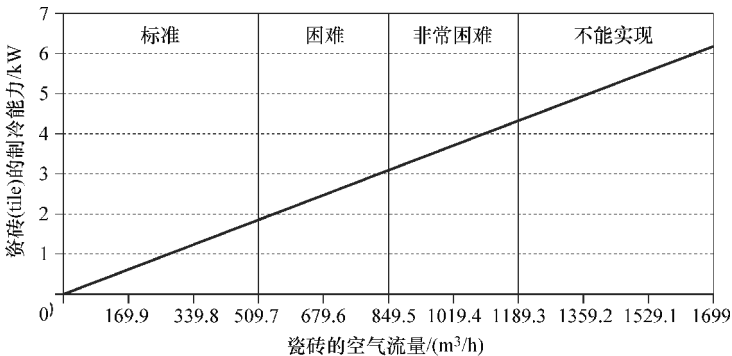


图 12.4 制冷能力与空气流量之间的函数关系

高密度房间

在每个机柜的装机容量大于 5 ~ 6kW 的房间里，则需在热源附近使用专门的冷

却系统，而且必须要进行评估。

随着功率密度的增加，主要技术解决方案如下：

1) 通道冷却系统：它们的空调单元安装在两个机架之间，排成行，它们可以被安装在高密度的机柜附近以补偿由经典的配置保证不了的冷却。

2) 每单位（或每机架）冷却系统：冷却系统（压缩机和热交换器）包含在机架本身，并且是密封的或单独放置在机架上。在外部环境中释放出的热量可以消除或转移到 HVAC 系统。

3) 位于服务器内的系统组件上的直接冷却系统。流体，通常是冷却水，经适当渠道与 CPU 和电子元件直接接触，带走热量。该系统的主要优点是其较高的散热性能，缺点是具有在 IT 设备附近流出流体的危险和高成本。

这些系统可以集成传统低密度冷却系统，或者完全被取代。

新的 IT 系统，几乎总是伴随着虚拟化，导致“热点”的形成。这个问题可以通过在负荷附近安装一个专用空调机组来解决。

在这些情况下不再需要加高地板；因为这对标准建筑来说通常意味着更高的天花板。

高密度机架的主要优点是：由于专用的冷却而产生较低的操作成本和在中心中可用空间的增加。

自然冷却

自然冷却（FC）允许在一定的条件下使用外部空气直接冷却数据中心，而无需使用 HVAC 系统，除了用于除湿。

有两种类型的 FC：

1) 直接冷却型：外部空气低温进入室内的地方，空气必须正确过滤、加湿或干燥，从而使其适合于内部的需求。

2) 间接冷却型：冷却是通过冷却塔中冷却剂的单通路进行，未经制冷压缩机处理。

在这两种类型中，尽管外部条件都不允许诸如全部 FC，但仍然有一部分温度范围可以执行自然预冷却，降低了需要保持设定温度的压缩机的工作。

FC 和自然预冷却的运行时间不同，取决于建筑位置的气候和内部温度设置。

根据数据中心的施工现场在不同月份的平均温度，在自然冷却模式下的操作时间、操作成本和投资回报时间可以估算。

自然冷却，尤其是间接自然冷却，也可以作为对现有的数据中心的一个改造，通过对系统加入一些组件，无需从根本上改变 HVAC 系统的配置。

温度和湿度设定点

房间内温度和湿度设定点的选择是两个可以显著影响数据中心效率的因素。

HVAC 系统的能源消耗一般占到总消耗量的 30% 左右，取决于那两个值。

温度的升高，一方面让 HVAC 系统中的消耗减少并且如果存在自然冷却系统

的话，将增加自然冷却系统每年的工作时间；另一方面，它也会减少 HVAC 系统的降档干预的可用时间，同时也会增加 IT 设备内部风扇的消耗，而这取决于机器 BIOS 中的温度设定点。

温度设定点的优化可能是一个节约能源的机会，但需要仔细分析。

数据中心的温度和相对湿度的参考值由 ASHRAE（美国供暖、制冷与空调工程师协会）和 ETSI（欧洲电信标准化协会）在它们的标准 EN 300019 - 1 - 3 中定义的，图 12.5 对这些值进行了总结。

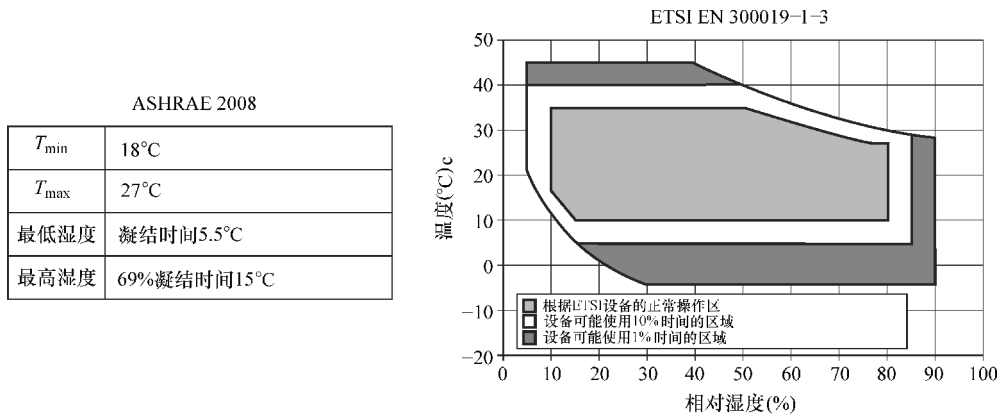


图 12.5 数据中心的温度和相对湿度的参考值（由 ASHRAE 和 ETSI 定义）

12.5 DG 和 CHP 的数据中心

数据中心的分布式发电（DG）和热电联合（CHP）的应用带来的成本节省可以通过如下形式来体现：

- 1) 降低与能源相关的成本，增强经济竞争力——减少燃料和电力采购，从而降低运营成本；
- 2) 提高可靠性，降低运行中断的风险——作为可靠的现场电源；
- 3) 提高能力以满足设备扩展的时间线——避免公用基础设施的升级需要。

由于其非常高的电力消耗，数据中心的电力成本较高。吸收式制冷的 CHP 系统的安装往往可以通过现场生产比电力运营商更便宜的电能，因此可以降低能源成本。此外，余热发电可驱动吸收式制冷机，取代空调负荷。

数据中心需要高品质和高度可靠的电源。很多类型的客户，包括数据中心、通信设施和其他关键任务的计算机系统等，它们很多的成本都和电源质量不高有关。

数据中心几乎都具备 UPS 系统作为后备电源并消除电源干扰。后备电池通常用于短期停电——几分钟到 1h。较长时间的停电通常使用备用的柴油发电机。

当 UPS 及电池系统无法满足需求时，现场发电，无论是发动机、燃料电池、

微型燃气轮机还是其他原动机等，可以提供可靠的电源以避免长时间停电。紧急备用发电机在停电时必须起动，与之相比，持续工作的 DG/CHP 系统提供了这种额外的可靠性。在停电的情况下，备用发电机通常需要 10 ~ 30s 满足负荷要求。

发展现场电源提供了数据中心使用者扩张和更新改造的灵活性。以新设备升级旧的，规模较小的数据中心可能会导致设施的电能需要大幅增加，电力供应在短期内可能无法满足。比起仅仅依靠现有的电网设施，与现有电网相结合的 DC/CHP 的系统可以更快地为系统提供额外电力供应。最大限度地减小外部电源的需求也减少了额外的公用基础设施的需求和相关成本，因为仅靠外部电网可能需要外部电网的更新或扩建。

12.6 组织能源效率[⊖]

要设计一个从传统的能源消耗数据中心向现代高能效的数据中心合适的迁移需要一个有利于这样迁移的组织调整。

图 12.6 描述了一个 IT 组织结构集成了懂得 IT 系统和物理基础设施系统的人员的技术。新的组织方法涉及将一个 IT 设施部门整合到其余的 IT 组织。

该组织调整显现出了一些优势。多年以来，IT 和设施部门作为独立的实体经营并且发展不同的文化，甚至用不同的语言。

其结果是，大多数数据中心设计/建造或升级工程是痛苦的、漫长的，而且成本高昂的。

这个新的 IT 设施群体是独立于传统建筑设施群体的。IT 设备集团是 IT 和设施建筑群之间的桥梁，但是在 IT 的直接控制之下。

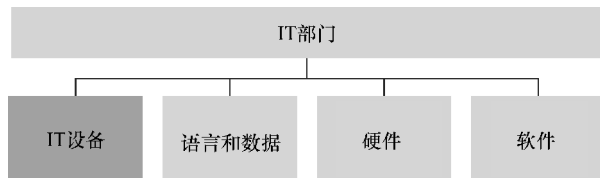


图 12.6 GreenGrid 提出的 IT 组织结构

IT 设备组指出数据中心的具体问题是硬件规划、电气部署、散热和物理数据中心监控。

这个组织的调整使数据中心团队能够快速部署一个高能效的数据中心的升级政策，来处理 IT 系统和物理基础设施系统。

⊖ Green Grid, white Paper no. 1 Guidelines for Energy – Efficient Data Centres。

深入阅读材料

M. Bramucci, D. Di Santo and D. Forni, Linee guida per la progettazione di datacenter ad alta efficienza, FIRE, 2011.
European Commission Joint Research Centre, *2011 Best Practices for EU Code of Conduct on Data Centres*.
The Green Grid. Library and Tools, <http://www.thegreengrid.org>
PG&E, *High Performance Data Centres: A Design Guidelines Sourcebook*, 2006.
US DoE, *FEMP Best Practices Guide for Energy-Efficient Data Center Design*.

第 13 章 无功补偿

Zbigniew Hanzelka、Waldemar Szpyra、Andrei Cziker
和 Krzysztof Piatek

无功功率在交流电气设备的操作中是必不可少的，但它的产生和传输影响了电力系统的操作。无功功率的产生和传输所引起的不良影响，包括增加有功功率和能量损失所带来的影响、增加电压降、降低网络组件的容量，因此也导致了更高的电力供应成本。在一个对称负荷网络中，各负荷阻值为 R （如线路或者变压器），功率损失可由下式计算出：

$$\Delta P = 3I^2 R = \frac{S^2}{V^2} R = \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \varphi} R = \frac{P^2}{V^2} R + \frac{Q^2}{V^2} R = \Delta P_a + \Delta P_r \quad (13.1)$$

式中 I ——流经网络组件的电流；

R ——网络组件中的电阻；

S ——流经该网络组件的视在功率；

$\cos \varphi$ ——功率因数；

V ——相电压的相位；

P 和 Q ——流经该网络组件的有功功率和无功功率；

ΔP_a 和 ΔP_r ——有功功率流和无功功率流所引起的功率损耗；

φ ——电流和电压之间的角度（°）。

功率损耗 ΔP_a 、 ΔP_r 与功率因数 $\cos \varphi$ 的比例如图 13.1 所示。

对称负荷网络组件上的电压降 ΔV 、电阻 R 和电抗 X 可由下式计算得出：

$$\Delta V = \frac{PR + QX}{V} = \frac{PR}{V} \left(1 + \frac{QX}{PR} \right) = \frac{PR}{V} \left(1 + \tan \varphi \frac{X}{R} \right) \quad (13.2)$$

式中 X ——网络组件中的电抗；

$\tan \varphi$ ——无功功率与有功功率的比值。

式 (13.2) 显示，网络组件上的电压降依赖于无功功率与有功功率之比 $\tan \varphi$ 和电抗与电阻之比 X/R 。

对于高架输电线来说， X/R 的值是 0.5/3，而对于变压器来说，这个值可达到 20。图 13.2 中展示了在不同 X/R 值下，功率因数与相对电压降之间的函数关系。取功率因数 $\cos \varphi = 1$ 时的电压降值为基准。

电源网络组件的大小以最大电流的方均根值或通过它们可传输的最大视在功率为准。无功电流或无功功率的存在降低了组件产生有功功率的能力。例如，如果元

件产生视在功率的能力等于单位 1p. u. (标么值), 那么将无功功率从 0.6 增加到 0.8 的同时, 也把有源功率从 0.8 降到了 0.6 (见图 13.3)。

在低功率因数下, 有源电力传输要求更高效力的电气设备 (例如增加导线横截面积或变压器的额定功率), 因此需要增加投入。图 13.4 所示为功率因数与投入大小的函数关系。

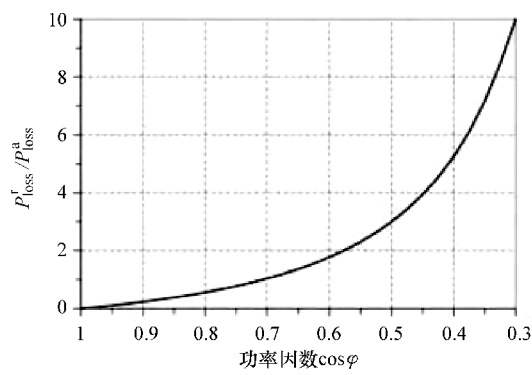


图 13.1 由无功功率流和有功率流所引起的功率损耗之比与功率因数 $\cos\varphi$ 之间的关系

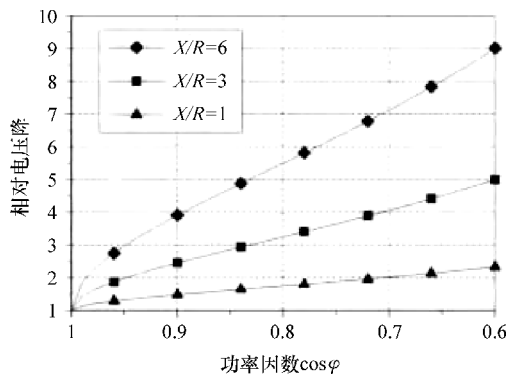


图 13.2 不同 X/R 下功率因数与相对电压降之间的函数关系

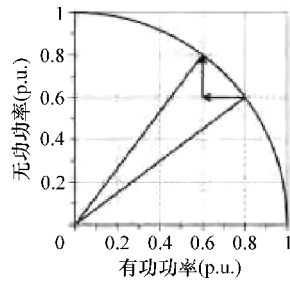


图 13.3 负荷无功功率的增加所引起极限负荷功率的变化

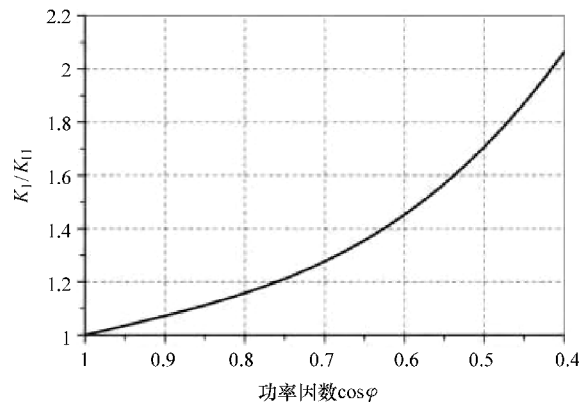


图 13.4 相对投资增加与功率因数 ($\cos\varphi < 1$ 时, K_I 是主要影响因素; $\cos\varphi = 1$ 时, K_{II} 是主要影响因素)

13.1 公用电力网络中的无功补偿

无功功率补偿对于电力系统的运营和发展规划显得尤为重要,因为在电力消费者附近安装电容器有助于减少电力和能源损失,减少电压降,并且无功功率补偿增加了网络有功功率的容量,也提高了稳压能力和电源质量。如果建立一个新的电力网络,也可以降低投资成本。

在电力系统中,无功功率补偿的任务通常是在输电网络和配电网络中分开解决的。在传输网络情况下,无功功率补偿的首要原因是为了提高稳压能力,从而提高了能量供应的安全性。在配电网络情况下,功率补偿在电力网络和工业网络中的目标是不同的。电力网络无功补偿的目的是降低流通成本,提高供电质量,而在工业网络中,它的目的是降低能源供应的成本。

在本章中,我们将讨论有关在分布式电网中安装电容器组的有效性的问题。

从下式可以计算出连接了一个容性负载(一个电容器)的网络组件的功率损耗:

$$\Delta P_K = \frac{P^2 + (Q - Q_K)^2}{V^2} R \quad (13.3)$$

切换电容器之前和之后,功率损失的差是

$$\Delta P_R = \Delta P - \Delta P_K = \frac{Q^2 - (Q - Q_K)^2}{V^2} R = \frac{2QQ_K - Q_K^2}{V^2} R \quad (13.4)$$

从式(13.4)中可以看到无功补偿的效果,即减少了功率损耗,这取决于两方面:电源补偿 Q_K 和补偿前流经元素的无功功率 Q 。有了这种依赖性后,可以很明显地从 $Q_K = Q$ (有功功率损耗达到的最小值等于传送有功功率时的损耗)得到功率损失的最大降低值。

由于网络的负荷随着时间的推移而变化,要计算出由补偿所降低的能量损失的数值,就要求了解负荷无功功率随时间的变化。如果假定电压为恒定值,在一个时间周期 T 里,无功功率补偿为固定值 Q_K ,由无功功率补偿导致减少的能量损失的数值可以由下式计算出:

$$\Delta W_R = \int_{t=0}^{t=T} \Delta P_R(t) dt = \frac{R}{V^2} \int_{t=0}^{t=T} (2Q_K Q(t) - Q_K^2) dt \quad (13.5)$$

式中 $\Delta P_R(t)$ ——有源功率损耗减少的瞬时值;

$Q(t)$ ——流过该网络组件的瞬时无功功率;

V ——电压;

T ——该时间段的持续时间(通常取 $T \approx 8760\text{h}$)。

应该指出的是, $\int_{t=0}^{t=T} Q(t) dt$ 等于时间 T 内流经元件 R 的无功电能 W_r 。因此式

(13.5) 中，有功能量损失的降低也可采取如下形式表示：

$$\Delta W_R = \frac{R}{V^2} (2 W_r Q_K - Q_K^2 T) \tag{13.6}$$

通过区分式 (13.6) 中的 Q_K ，比较差为零的补偿器的额定功率，其中在周期 T 内，在电路中所实现的有功电能损失的最大降幅可以确定为

$$\frac{\partial \Delta W_R}{\partial Q_K} = \frac{2 R}{V^2} (W_r - Q_K T) \Rightarrow Q_K^{\max} = \frac{W_r}{T} \tag{13.7}$$

无功电能 W_r 的数值，可以使用无功电能表计量出来。

配电网由高压 (HV)、中压 (MV)、低压 (LV) 3 种电网组成。HV 电网在一个封闭结构中工作，而对于 MV 和 LV 网络，虽然它们往往建立成封闭结构，但它们始终工作在开放式结构中。图 13.5 所示为 HV/MV 变电站供给的 MV 电网的简图。

该网络中的无功功率补偿电容器可以与配电站中供给电网的 MV 母线相连接，或者连接到变电站中 MV/LV 变压器的 LV 绕组上。这些因素在图 13.5 中具体展示成分布式网络，其中补偿电容器要连接到 MV/LV 变压器的 LV 绕组上。

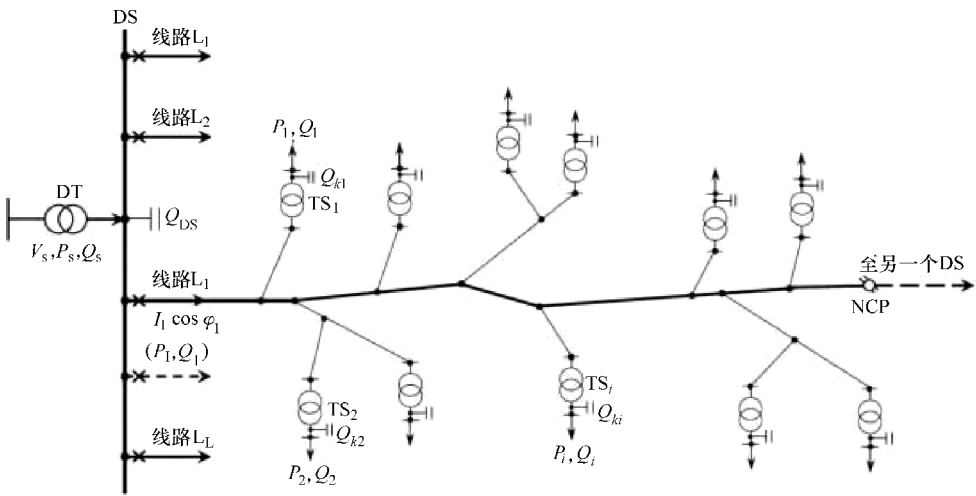


图 13.5 MV 电网简图 [DS - HV/MV 配电站；DT - HV/MV 配电变压器； P_i 、 Q_i 有功无功电源线 L_i ； TS_i 为第 i 个 MV/LV 变电站； P_i 、 Q_i 分别为第 i 个变电站负荷的有功和无功功率； Q_{ki} 是安装在变电站的电容器的额定功率； Q_{DS} 是安装在配电站的电容器的额定功率； P_s 、 Q_s 是有功和无功电源配电站；NCP 是电网分开关（电网接入点），其他符号在文中都进行了解释]

为了确定安装在电网中的电容器对功率和能量损耗的影响，就有必要知道电网组件的负荷。不幸的是，由于电网组件数量众多，并且缺少测量，所以有关电网组件负荷的信息不可用。因此，在有这样配置的网络中，我们采取了简化的方法计算

功率和能量损失。在参考文献 [1-7] 中提供了几种计算配电网中损耗的简单方法。其中一个方法,如图 13.5 所示的网络中,每个独立电路 l_l 都可以表示为负荷沿直线均匀分布的等效电路,如图 13.6 所示。使用这些简化的方法需要以下假设:

1) 所有电路供应的 MV/LV 变压器都是按额定功率的比例进行充电的。

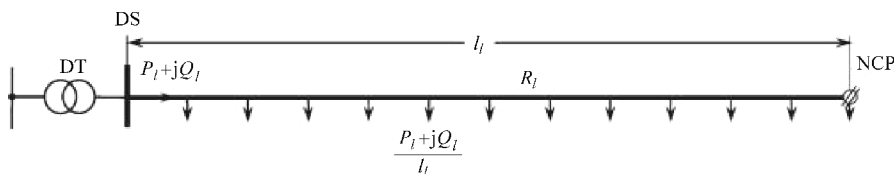


图 13.6 负荷均匀分布的电路 [l_l 是电路/主线的长度
(从配电站到 NCP, m); R_l 是电路/主线的电阻 (Ω)]

2) 负荷随时间的变化对于由电路供给的所有变压器来说都相同。

3) MV/LV 加载的功率因数都相同,并且等于电路负荷功率因数。

在负荷沿直线均匀分布的电路中,功率损失比相同的负荷集中在尾端的电路低 2/3。利用这个关系,功率损失可经过计算得出:

$$\Delta P = \frac{P_l^2 + Q_l^2}{3V^2} R_l \quad (13.8)$$

考虑式 (13.8), 在安装了电容器的 MV/LV 变电站中, MV 电网单回路的功率损耗的降低值可以用公式估算:

$$\Delta P_{R_l} = (2Q_l Q_{K_l} - Q_{K_l}^2) \frac{R_l}{3V^2} + \{2Q_l(Q_{K_l} - Q_{M_l}) - (Q_{K_l} - Q_{M_l})^2\} \frac{\sum_{i \in NTS_l} P_{K_i}}{\left(\sum_{i \in NTS_l} S_{n_i}\right)^2} \quad (13.9)$$

而能量损失的降低值可以由下式得出:

$$\Delta W_{R_l} = (2W_{r_l} Q_{K_l} - Q_{K_l}^2 T) \frac{R_l}{3V^2} + \{2W_{r_l}(Q_{K_l} - Q_{M_l}) - (Q_{K_l} - Q_{M_l})^2 T\} \frac{\sum_{i \in NTS_l} P_{K_i}}{\left(\sum_{i \in NTS_l} S_{n_i}\right)^2} \quad (13.10)$$

式中 NTS_l ——由电路 l 供给的一座变电站;

Q_{K_l} ——安装在线路 l 供给的变电站中的电容功率之和;

Q_{M_l} ——MV/LV 变压器的励磁功率总和;

P_{k_i} ——第 i 个 MV/LV 变压器的额定负荷 (满负荷);

S_{n_i} ——第 i 个 MV/LV 变压器的额定功率。

安装在变电站的电容器的功率,跟变电站变压器的额定功率成比例,式 (13.9)

和式 (13.10) 来自于这样的假设。如果从变电站的无功电能已知, 从式 (13.7) 就可以确定输出电容。

MV 电网中的无功功率补偿也会降低供应该网络的 HV/MV 电网的功率和能量损耗。HV/MV 变压器额外降低的功率损耗的值可以通过下式估算出来:

$$\Delta P_{R_{DT}} = (2Q_s Q_{K_l} - Q_{K_l}) \frac{P_{k_{DT}}}{S_{n_{DT}}^2} \quad (13.11)$$

而额外降低的能量损耗的值可由下式估算:

$$\Delta W_{R_{DT}} = (2W_{r_{DT}} Q_{K_l} - TQ_{K_l}^2) \frac{P_{k_{DT}}}{S_{n_{DT}}^2} \quad (13.12)$$

式中 Q_s ——从配电变压器接收到的无功功率;

$P_{k_{DT}}$ ——视配电变压器而定的负荷损耗;

$S_{n_{DT}}$ ——配电变压器的额定功率。

当一个电容器只连接在供应 MV 电网的配电站开关处时, 式 (13.11) 和式 (13.12) 提供了计算降低损耗值的方法。在这种情况下, 安装在变电站 Q_{K_l} 的电容器的总功率, 可以替换成安装在站 Q_{DS} 中的电容器的功率。

13.1.1 无功补偿的经济效益

负荷达到峰值时的功率损耗的降低值 ΔP_{R_s} 和一年中能量损耗的降低值 ΔW_{R_y} 的基础上, 可以计算出由于安装电容器每年的节省量:

$$Q_y = \Delta P_{R_s} k_p + \Delta W_{R_y} k_A \quad (13.13)$$

式中 k_p ——单位功率损耗的成本;

k_A ——单位能量损耗的成本。

为了评估安装电容器的经济效益, 有必要知道电容器的价格以及安装和操作成本。为了简化计算, 电容器的价格可以近似为线性函数 (见图 13.7):

$$C_p = k_v Q + k_f \quad (13.14)$$

式中 C_p ——电容器价格;

Q ——电容器额定功率;

k_f ——常数;

k_v ——可变的, 独立于电源和电容器的成本, 但是由电源和电容器元件所决定。

电容器的安装成本 k_i 必须加在电容器价格上。安装在由电路 l 供给的 NTS_l 变电站上的电容器, 总额定功率为 Q_{K_l} , 它的购买和安装成本可以是

$$K_{l_i} = k_v Q_{K_l} + NTS_l (k_f + k_i) \quad (13.15)$$

式中 k_i ——电容器安装成本;

NTS_l ——安装在由电路 l 供应的变电站上的电容器数量。

净现值率 (NPVR) 可以作为测量经济效益的一种方法, 来计算 n 年的电容器的操作成本:

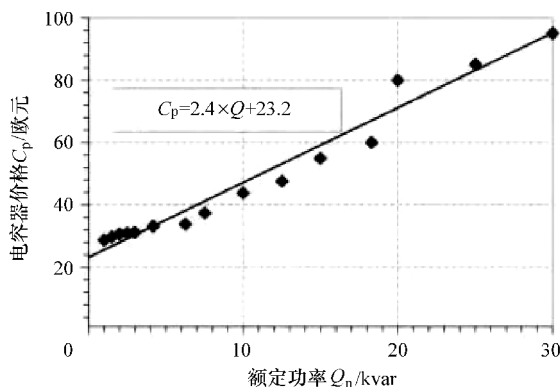


图 13.7 MKPg 型电容器价格与额定功率之间的关系

$$NPVR = \frac{\sum_{y=0}^n (CI_y - CO_y) (1+i)^{-y}}{\sum_{y=0}^n K_{I_y} (1+i)^{-y}} \quad (13.16)$$

式中 K_{I_y} —— y 年的资本开支；

CI_y —— y 年内的资金流入；

CO_y —— y 年内的资金流出；

n ——是计算期(建设期 + 预期的经营期限)；

i ——折现率(利率)，表示为小数。

式(13.16)中的投资 K_{I_y} ，由式(13.15)计算出的电容器的购买和安装成本所替代。资金流入 CI_y 是由式(13.9) ~ 式(13.12)计算出的，通过降低功率和能量损耗所得到的费用抵消支出 CO_y 。通常假设运营成本与投资额成正比，因此支出 CI_y 将是

$$CO_y = K_{I_y} k_{ec} \quad (13.17)$$

式中 k_{ec} ——固定经营成本因素。

假设在年末 $y=0$ 时购买和安装了电容器，并且在随后的几年中，由降低损耗所带来的节省额是一样的，那么对于电路 l 的公式 $NPVR_l$ 可以采取下面这种形式：

$$NPVR_l = \frac{Q_{y_l} SD - K_{I_l} (1 + k_{ec} SD)}{K_{I_l}} = \frac{O_{y_l} SD}{K_{I_l}} - (1 + k_{ec} SD) \quad (13.18)$$

式中 SD ——折扣因素的总和：

$$SD = \sum_{y=1}^n (1+i)^{-y} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (13.19)$$

$NPVR$ 的值越高，无功功率补偿就越有利。

另一个测量无功功率补偿有效性的方法，等价于测量降低能量损耗的单位成本

(用简化方法，在整个分析期间计算出来的平均数)。等效单位成本，是分析期间内，每年成本贴现之和与每年效益贴现之和的商：

$$k_{eq} = \frac{\sum_{y=0}^n (K_{I_y} + CO_y) (1+i)^{-y}}{\sum_{y=0}^n \Delta W_{R_y} (1+i)^{-y}} \tag{13.20}$$

式中 ΔW_{R_y} ——通过式 (13.10) 和式 (13.12) 计算出来的在 y 年能量损耗的降低值。

k_{eq} 越低，无功功率补偿就越有益。如果 $k_{eq} \geq k_A$ ，补偿就变得不可行。

图 13.8 说明了 NPVR 随着安装在 3 条线路中的电容器的总额定功率而变化，安装在 110kV/15kV 的配电站中的 25MVA 变压器供应这 3 条线路。图 13.9 展示了降低能量损耗的等效单位成本随电容器总额定功率的变化关系。

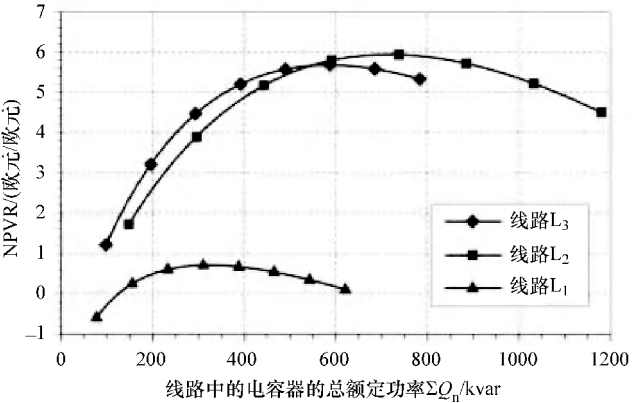


图 13.8 NPVR 随安装在线路中的电容器的总额定功率变化

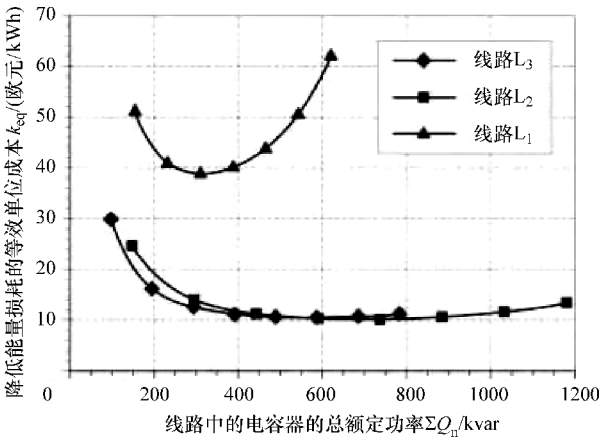


图 13.9 能量损耗的等效单位成本随安装在线路中的电容器的总额定功率变化

分析上述结果表明,在 MV/LV 站安装无功功率补偿电容,是一个降低配电网能量损耗的有效方法。然而,从经济上来说,它并不总是可行的。例如,在线路 L_1 上,它的成本效益很低。安装在给定电路中的电容器的最佳功率,是得到最高 NPVR 时的功率。

13.2 工业网络的无功补偿

能源供应商与消费者必须遵守电气能源供应协议。如果无功与有功功率之比不超过一个特定的值,例如 0.4,通常供应商会保证能源关税成本,这相当于保持在大约 0.93 的功率因数。任何超过该值的行为,都将受到财政处罚,所以控制其自身的无功负荷,是对消费者负责任。

可以有两种主要方法来解决无功功率的问题。第一种方法是“自然方法”,这涉及对安装负荷详细的分析,和对它的工作模式、控制装置以及电源线连接变化上的分析,使整体的无功与有功功率的比例不超过其限制值。该方法在实际上有时难以运用,因为它需要在实践中深入了解负荷的有关操作和工作条件。此外,需要的变化并非始终能应用。该方法通常是最便宜的,因为它不考虑特殊补偿设备的安装。然而,经分析表明,改变负荷使其更适合操作。一个应用自然方法的例子是考虑使用可控整流器,其正常的直流电压 $V_{DC,N}$ 明显低于最大电压 $V_{DC,max}$ 。整流器的输出直流电压 V_{DC} 大约为 $V_{DC} \approx 1.35 V \cos \alpha$,其中 V 是三相电源电压的相位, α 是触发角。最大直流电压因此等于 $V_{DC,max} \approx 1.35 V$,并且只受电源电压影响。忽略高次谐波分量,整流器的功率因数(PF)等于 $PF = \cos \alpha$,它产生的功率因数 $PF = V_{DC} / (1.35 U)$ 。在 $V_{DC,max}$ 和 $V_{DC,N}$ 差别较大的情况下,控制角增大,因此功率因数 PF 降低。降低整流器的电源电压,例如,通过交换具有较低的二次侧的额定电压的电源变压器,提高了功率因数。

第二种方法是无功功率补偿,换句话说,就是用专用补偿器现场产生感性无功功率。该方法是非常有效的,假设自然方法是用来正确地设计整个系统,那么补偿器就可以用来保持功率因数低于限制值。

安装无功补偿器的一些典型案例如下:

1) 线性静态负荷——线性负载的无功功率是确定的并且不会迅速改变,如感应电动机、电力变压器。这是最简单的情况,它并没有给补偿器施加任何限制,所以带有典型稳压器的电容器,它的典型电池是可以使用的。

2) 动态负荷——负荷的无功功率变化迅速。补偿器必须对电源的变化作出足够快的反应。一般的负荷也是非线性的,例如电弧炉。一个基本的解决方案涉及开关电容器。最先进的解决方案是:TSC(晶闸管投切电容器)、FC/TCR(固定电容器/晶闸管控制电抗器)、STATCOM(静止同步补偿器)。最先进的解决方案[有源电力滤波器(APF)]也可以被用于功率因数校正,但由于设备的整体成本,应

慎重考虑 APF 的安装。

3) 非线性负荷——引起非正弦电流流动的负荷，主要是电力电子器件，如直流驱动器输入整流器。非线性负荷的存在，通常也表明存在由电压降引起的非正弦电源电压供给。由于存在共振的可能性，所以在设计时应特别小心补偿器。如果电源没有迅速变化，那就可以给电容器的电池配备串联电抗器，来改变电池的光谱特性，并且介绍了串联谐振。在这种情况下，补偿器变成无源滤波器。该过滤器可以进一步扩展，以补偿不同的谐波分量。最先进的解决方案涉及 APF 的安装，同时也提供谐波过滤。

当考虑到补偿器的位置时，应该提到以下 3 条：

1) 独立补偿：对负荷进行补偿时，是由合适的电容器分开独立补偿的。

2) 所有负荷在一点上集中补偿。补偿器安装在主供应站，靠近公共耦合点 (PCC) 和结算点 (settlement point)。该补偿器通常可以有不同的无功功率，所以它可以按照不同负荷所需的功率因数进行补偿。

3) 对于一组负荷来说，当有广泛的内部网络，例如几个变电站连接到主电源站时，就采用组补偿。补偿器安装在变电站中，是为了避免无功功率在内部电网流动。应该注意的是，能量问题在主电站已经被解决，所以应保持变电站的功率因数低于限制值。

当能源消费者仅从一根电源线上获取电量时，就会出现一种典型情况。上面只有一个纳入考虑的能源解决点。当有几条馈送线，即能量符合关税计算时有几个能量解决点，就会出现一个更复杂的情况。这要求在这样的点上保持所需的无功功率，即功率因数（切线等效）。

13.2.1 线性负荷

无功功率平衡规则：

$$Q_{\text{des}} = Q_{\text{nat}} - Q_{\text{comp}} \quad (13.21)$$

式中 Q_{des} ——在 PCC 中所要求的无功功率数值，通常这取决于有源负荷功率，并且它作为后者的百分比出现，例如在大多数情况下，如果馈送线的有功功率和无功功率之比小于 40%，那也就是 $\tan\varphi < 0.4$ ，这相当于大约 0.93 的功率因数；

Q_{nat} ——负荷的自然或额定无功功率；

Q_{comp} ——补偿器的无功功率，是在要保持在功率 Q_{des} 下的无功功率数值。

补偿器作为一个（感性）无功功率源起作用。假设补偿器不改变有功功率流，即忽略损耗，并且补偿是通过电力电容器获得的，那么平衡公式可以转化为

$$Q_{\text{comp}} = P_{\text{load}} (\tan\varphi_{\text{nat}} - \tan\varphi_{\text{des}}) \quad (13.22)$$

式中 P_{load} ——负荷有功功率；

$\tan\varphi_{\text{nat}}$ ——自然功率，即非补偿功率 $\tan\varphi$ 的值；

$\tan\varphi_{\text{des}}$ ——通过补偿器得到的数值。

因此自然无功功率 Q_{nat} 和 $\tan \varphi_{\text{nat}}$ 的值可以通过以下两种方法获得:

1) 分析计算: 知道设备的参数以及工作模式就可以计算出无功功率。这通常是在设计阶段, 由设计工程师完成的。这种方法可能不准确, 因为设备很少在它标称的条件下工作, 并且在设计阶段, 它的工作模式也很难被确定。因为, 比如, 实际生产的大小是不可知的。对于集中补偿来说, 工作负荷的同时性也应该考虑在内。因此分析计算只给出了一个自然无功功率的近似值。

2) 测量法: 在一个足够长的时间内, 例如一周, 用可以确定有功和无功功率的分析仪进行测量, 并且要有足够的平均窗, 例如 10min。这种方法的主要优点是测量的功率是由负荷实际消耗的。假设测量周期足够长, 能覆盖整个工艺过程, 那就可以得到详细的无功功率的数值和变化情况。测量方法, 同时可以用来检查正确性, 也可以调整在分析计算基础上设计的补偿器。显然这种方法不能在设计阶段使用。它的缺点是只可以在正常条件下进行测量, 所以无功功率必须通过其他方法进行设计。

13.2.1.1 例1——集中补偿

让我们来考虑一个由额定功率为 $S_N = 400\text{kVA}$ 、短路电压 $e_{\%} = 4.5\%$ 的变压器供应的一个 400V 的交换机。该交换机提供总有源功率为 $P = 190 \sim 208\text{kW}$ 、功率因数为 0.62 ~ 0.68 的负荷。确定补偿器的最大和最小功率, 以补偿无功功率的功率因数, 值为 0.92。

为了达到计算的目的, 电力系统的短路容量、电阻元件和补偿器的无功功率损失可以忽略不计。假设电源电压是不失真的。

因为有源功率变化, 所以功率因数和负荷无功功率也是可变的。由于没有功率因数与有功功率之间的相关性信息, 所以我们应该假设极端情况并求出在给定的 Q/P 值之下最大和最小的补偿功率。最大功率是在有功功率最大并且 $\tan \varphi$ 值差异最大时求到的, 即在功率因数最小为 0.62 时。相应地, 最小功率是在有功功率最小且功率因数最大为 0.68 时得到的。因此, 我们得到:

$$Q_{k, \min} = 190 \times (1.078 - 0.426) = 123.93\text{kvar}$$

$$Q_{k, \max} = 208 \times (1.265 - 0.426) = 174.61\text{kvar}$$

式中 $Q_{k, \min}$ 和 $Q_{k, \max}$ ——最小和最大补偿器功率。

因此, 补偿器无功功率具有一定的恒定值 $Q_{\text{const}} = 123.93\text{kvar}$, 而变化范围是 $Q_{\text{reg}} = 50.61\text{kvar}$ 。

13.2.2 组补偿

当一个消费者保持在一个内部电网中, 比如这个电网覆盖了很大的区域, 这时组补偿就会非常有用。这种情况下, 就有几个通过架空线或电缆连接到主电源站的变电站。为了避免主电源站和变电站之间的无功功率流动, 地区的负荷补偿会配置在当地的变电站处。因此, 安装补偿器的目的不只是保持无功功率低于限制值, 还要保证内部电网的损失达到最小化。所以在评估当地无功补偿器时, 必不可少地要

考虑线电阻。

让我们假设存在由主电源站供给的变电站 i 。每个变电站供给自身负荷时，有功功率为 P_i ，无功功率为 Q_i 。总无功功率需要补偿给负荷，因此主电站中保持的确定值就等于

$$Q_K = P_{\text{tot}} (\tan \varphi_{\text{tot}} - \tan \varphi_{\text{des}}) \quad (13.23)$$

式中 P_{tot} ——当地负荷功率总和：

$$P_{\text{tot}} = \sum_i P_i \quad (13.24)$$

式中 P_i ——变电站 i 中负荷的有功功率。

$\tan \varphi_{\text{tot}}$ 是总的自然无功功率与有功功率的比，可以从下式得到：

$$\tan \varphi_{\text{tot}} = \frac{Q_{\text{tot}}}{P_{\text{tot}}} = \frac{\sum_i Q_i}{\sum_i P_i} \quad (13.25)$$

式中 Q_{tot} ——负荷总的无功功率，等于变电站无功功率之和；

Q_i ——变电站 i 中负荷的自然无功功率。

下一个步骤是根据传导损耗分发总无功功率 Q_K 到当地变电站。变电站 i 中，当地无功补偿器的功率应该等于：

$$Q_{k,i} = Q_i - (Q_{\text{tot}} - Q_K) \frac{R}{R_i} \quad (13.26)$$

式中 Q_i ——自然无功功率；

Q_{tot} ——总的自然无功功率；

Q_K ——总的补偿功率；

R_i ——第 i 个变电站与主电源站的连接线的电阻；

R ——总的等效电阻，可以通过下式得到：

$$\frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad (13.27)$$

这种补偿器功率的选择，可能会导致地方变电站的功率切线与所要求的值不同。然而在主供应站中，无功功率与有功功率的比例是保持在要求水平上的。差异取决于线电阻，即导通功率损耗。

13.2.2.1 例 2——组补偿

让我们来考虑一个供应 4 个地方变电站 (LSS) 的主供应站。表 13.1 展示了相关参数，其中 P_n 是额定有功功率， Q_n 是额定（自然）无功功率。图 13.10 大致示出了这个系统。

设计无功补偿使功率因数不超过 $\text{PF}_{\text{des}} = 0.93$ （相当于 $\tan \varphi_{\text{des}} = 0.4$ ）。假设内部电源线是由单元电导为 $\gamma = 55 \text{ m}\Omega/\text{mm}^2$ 的铜制成的，电源线的电感和电容可以被删去。通过以下两种方法可以解决这个问题：

1) 组补偿中, 每个变电站补偿的功率因数 $PF_{des}=0.93$ ($\tan \varphi_{des}=0.4$), 即均匀分布补偿。

2) 组补偿中, MSS 所要求的功率因数 $PF_{des}=0.93$ ($\tan \varphi_{des}=0.4$), 即损失最小化补偿。

表 13.1 组补偿 (例 2)

参 数				
LSS1	LSS2	LSS3	LSS4	
P_n/kW	30	35	45	70
Q_n/kvar	30	46.5	42	75
线长, l/m	150	30	120	60
横截面积, s/mm^2	16	25	35	35
均匀分布补偿——切线和无功功率				
$\tan \varphi_i$	1	1.328	0.933	1.071
PF_i	0.707	0.601	0.731	0.628
$Q_{k,j}/\text{kvar}$	18	32.5	24	47
均匀分布补偿情况下的功率损耗				
$R_i/\text{m}\Omega$	170.45	21.82	62.34	31.17
$\Delta P_{p,i}/\text{W}$	958.81	167.05	788.96	954.55
$\Delta P_{q,i}/\text{W}$	153.41	26.73	126.23	152.73
最小损耗补偿——切线和无功功率				
$Q_{k,j}$	25.77	13.44	30.43	51.86
$\tan \varphi_i$	0.414	0.944	0.257	0.331
PF_i	0.924	0.727	0.968	0.949
最小损耗补偿下的功率损失				
$\Delta P_{p,i}/\text{W}$	958.81	167.05	788.96	954.55
$\Delta P_{q,i}/\text{W}$	19.07	149.02	52.16	104.31
集中补偿情况下的功率损耗				
$\Delta P_{p,i}/\text{W}$	958.81	167.05	788.96	954.55
$\Delta P_{q,i}/\text{W}$	958.81	294.85	687.27	1095.78

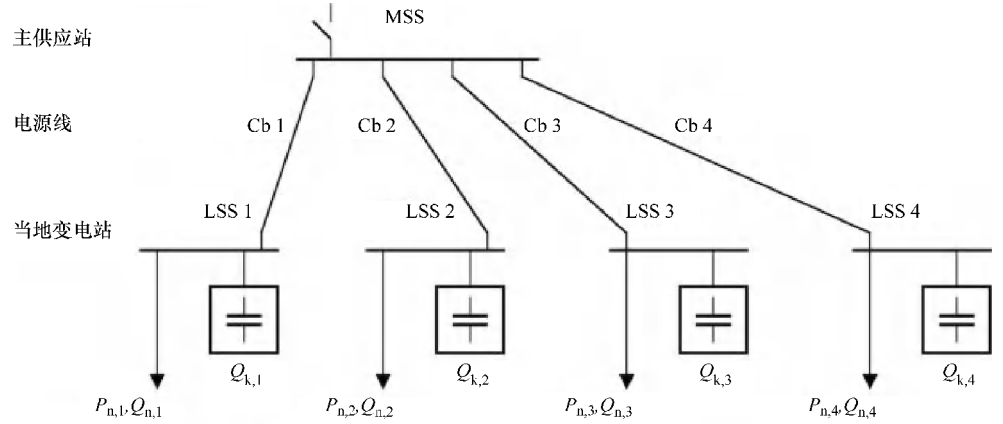


图 13.10 例 2 供应系统示意图——当地变电站的组补偿

第一种方法带有均匀分布无功补偿的组补偿，不考虑损失，然而补偿是配置在当地变电站的。我们的目标是补偿局部无功功率，所以每个变电站的功率因数应该等于要求值 $PF_{des} = 0.93$ ($\tan \varphi_{des} = 0.4$)。因此主供应站的功率因数也应该等于 $PF_{des} = 0.93$ 。对于中心供应站来说，这些计算是相似的，但补偿是分别来自每个变电站单独得到的。自然无功功率与有功功率的比值以及补偿器的功率等于下式：

$$\begin{aligned}\tan \varphi_i &= Q_i/P_i \\ Q_{k,i} &= P_i (\tan \varphi_i - \tan \varphi_{des})\end{aligned}$$

现在可以将损耗考虑在内。让我们分别考虑两种损耗：在变电站 i 中，由有功功率转换引起的功率损耗 $\Delta P_{p,i}$ 以及由无功功率转换引起的功率损耗 $\Delta P_{q,i}$ 等于下式：

$$\begin{aligned}\Delta P_{p,i} &= \frac{P_i^2}{V^2} R_i \\ \Delta P_{q,i} &= \frac{(Q_i - Q_{k,i})}{V^2} R_i\end{aligned}$$

式中 V ——电源电压。

电缆电阻 R_i 为 $R_i = l_i/(s\gamma)$ ，其中 l_i 是电缆的长度， s 是横截面面积， γ 是电缆的单位电导。表 13.2 进行了结果展示。总损耗为

$$\begin{aligned}\Delta P_p &= \sum_i \Delta P_{p,i} = 2869.36\text{W} \\ \Delta P_q &= \sum_i \Delta P_{q,i} = 459.10\text{W} \\ \Delta P &= \Delta P_q + \Delta P_p = 3328.46\text{W}\end{aligned}$$

由无功功率转换引起的功率损耗占总损耗 ΔP 的 13.79%。

第二种情况，损耗最小化补偿可以进一步降低功率损耗。总的有功功率和无功功率以及功率正切值分别等于：

$$\begin{aligned}P_{tot} &= 30 + 35 + 45 + 70 = 180 \text{ (kW)} \\ Q_{tot} &= 30 + 46.5 + 42 + 75 = 193.5 \text{ (kvar)} \\ \tan \varphi_{tot} &= \frac{193.5}{180} = 1.075\end{aligned}$$

表 13.2 不同补偿方法的损失比较

补偿	均匀分布	最小损耗	集中
LSS 1/kvar	153.41	19.07	958.81
LSS 2/kvar	26.73	149.02	294.85
LSS 3/kvar	126.23	52.16	687.27
LSS 4/kvar	152.73	104.31	1095.78
无功功率传输损耗/W	459.1	324.57	3036.71
总传输损耗/W	3328.46	3193.93	5906.07

因此总的补偿功率等于:

$$Q_K = 180 \times (1.075 - 0.4) = 121.5 (\text{kvar})$$

总的等效电阻可以从下式得到:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{170} + \frac{1}{114} + \frac{1}{62} + \frac{1}{15}$$

$$R = 10.26 \text{m}\Omega$$

因此当地补偿器功率和功率因数见表 13.1。

假设导线横截面积与组补偿中的横截面积相同,那么就可以根据表 13.1 计算损耗。总损耗是

$$\Delta P_p = \sum_i \Delta P_{p,i} = 2869.36 \text{W}$$

$$\Delta P_q = \sum_i \Delta P_{q,i} = 324.57 \text{W}$$

$$\Delta P = \Delta P_q + \Delta P_p = 3193.93 \text{W}$$

由无功功率转换引起的损耗占总损耗 ΔP 的 10.16%。

为了更好地比较,让我们考虑集中补偿。这种方法只考虑主电源站,并且不涉及任何损耗计算。只有一个补偿器,并且它的功率为 Q_K 。然而,自然无功功率应该被传送到当地变电站,这将导致额外的功率损耗,结果见表 13.1。总损耗为

$$\Delta P_p = \sum_i \Delta P_{p,i} = 2869.35 \text{W}$$

$$\Delta P_q = \sum_i \Delta P_{q,i} = 3036.71 \text{W}$$

$$\Delta P = \Delta P_q + \Delta P_p = 5906.07 \text{W}$$

由无功功率转换引起的损耗占总损耗 ΔP 的 51.42%。要注意的是,在这种情况下,无功功率和有功功率的传送所引起的电流流动,可以使电源线超载。表 13.2 总结了主要结果。可以指出的是,在任何情况下,补偿所需要的总的无功功率是相同的。区别在于补偿器的布置。

13.2.3 非线性负荷

非线性负荷引起非正弦电流的流动,也就是说,电流被分解成了一个基本谐波分量和高次谐波分量。这种情况应该分开考虑,因为一个电容器可改变系统的频谱特性。结果一些高次谐波会被放大,导致 PCC 中补偿器的过电流和电压畸变。

让我们考虑一个简单系统,带有非线性负荷的补偿器和变压器。这个系统可以如图 13.11 所示,其中 $I_{(n)}$ 是第 n 次谐波源电流。 X_{Tr} 是基本谐波计算的变压器的电抗。 X_c 是基本谐波下补偿器的电抗。 n 是相对频率(与基本频率相比,所以 $f = nf_{(1)}$; 整数 n 等效为谐波阶次)。这种情况下的等效阻抗(实际上是电抗,假设电阻被忽略)为

$$Z_z(n) = \frac{-n X_{Tr} X_c}{n^2 X_{Tr} - X_c} \quad (13.28)$$

谐振条件与分子或分母的零值有关。电路元件的值为正时，只有分母可以为零。也就是 $n^2 X_{\text{Tr}} - X_c$ 发生这种情况，这也是并联谐振的条件；共振频率 $n_r = \sqrt{X_c/X_{\text{Tr}}}$ 。任何谐波电流分量都会引起系统阻抗两端的电压降，即变压器电抗等于 $V_{(n)} = I_{(n)} Z_z(n)$ ， $n = n_r$ 时电压降是无限的。注意到 $\text{THD} = (\sqrt{\sum_{(n)} V_{\text{N}}^2}/V_{\text{N}}) \times 100\%$ ，其中 V_{N} 是额定相电压的有效值。接近频率 n_r 的谐波分量会在很大程度上使 PCC 中的电源电压失真。

为了处理这个问题，可以添加串联电抗器。电抗器为串联谐振创造了条件。这种情况下的等效电路如图 13.12 所示，其中 X_d 是串联电抗器的电抗。该电路的等效电阻为

$$Z_z(n) = \frac{n X_{\text{Tr}} (n^2 X_d - X_c)}{n^2 (X_{\text{Tr}} + X_d) - X_c} \quad (13.29)$$

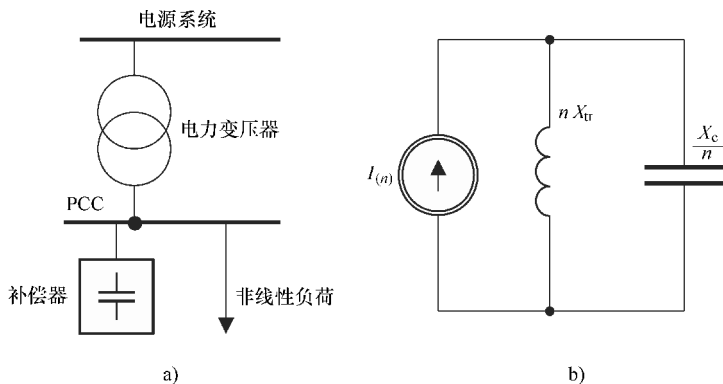


图 13.11 一个由非线性负荷构成的简单电路、电力变压器和补偿器
(图 13.11a) 以及系统的等效电路 (图 13.11b)

分子或分母为零时，可能有两种选择。当满足串联谐振的条件 $n^2 X_d - X_c = 0$ 时，分子为零。如果共振频率 n_s 是已知的（例如在项目进行过程中已经被选择），可以根据 $X_d = X_c/n_s^2$ 计算出该电抗器的电抗。对于分母来说，我们可以得到并联谐振的条件关系式： $n^2 (X_{\text{Tr}} + X_d) - X_c = 0$ ，共振频率是

$$n_r = \sqrt{\frac{X_c}{X_{\text{Tr}} + X_d}} \quad (13.30)$$

应该指出的是，与没有串联电抗器的电路比较，并联谐振频率已经移向较低的频率。因此，在选择电抗器时，应选择与那些串联谐振频率与所呈现的最低谐波相匹配的。在其他

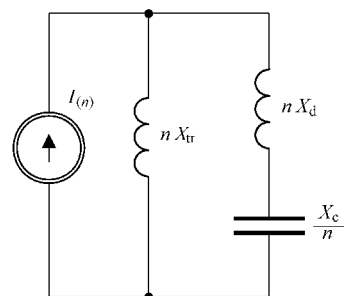


图 13.12 扼流补偿器的
等效电路

情况下,电抗器的并联谐振频率会向电流频谱中更低的谐波转移,这可能导致电流谐振。与未安装电抗器的电路相比,这可能会增加电压失真。

正确选择补偿元件,即电容器和电抗器,需要确定它们的工作条件。根据图 13.12,运用基尔霍夫电流定律可以求出电容器分支的电流 I_f :

$$I_{f(n)} = I_{(n)} \frac{n^2 X_{tr}}{n^2 (X_{tr} + X_d) - X_c} \quad (13.31)$$

式中 $I_{(n)}$ ——第 n 次高次谐波的有效值;

X_d 、 X_{tr} 、 X_c ——基波条件下元件的电抗。

我们根据公式 $RMS = \sqrt{\sum I_{(n)}^2}$ 计算电流有效值。计算出的值应小于所允许的电流值,在有些情况下,允许电流值可以由公式 $I_{rms} = 1.35 I_{CN}$ 得到,其中 I_{CN} 是电容器的额定有效电流。

可以根据基尔霍夫电压定律,或者利用计算出来的补偿器的支路电流来求得电容器电压。运用电压分压器,电容器的基波有效电压是 $V_{C(1)} = X_C V / (X_C - X_d)$ 。应该指出的是,由于有不同电抗的迹象,与没有扼流时的电压相比,此时电容器两端的电压会更高。由于失真的电流流过电容器,电压甚至会更高。从公式 $RMS = \sqrt{\sum I_{(n)}^2}$ 得到的有效电压应该小于允许的最大持续工作电压。确定为 $V_{C,rms} < 1.1 V_{CN}$,其中 V_{CN} 是标称电容电压。该限制值依据参考文献 [5] 选择。

峰值电容电压的条件也应该被检查。正弦波的组合物,可能会产生高的峰值幅度,这可能会超过电容器的击穿电压。最坏的情况可以根据公式 $MAX = \sum V_{(n)}$ 确定,并且该值要小于最大允许峰值电压,即 $V_{C,max} < 1.2 V_{CN}$ 。

13.2.3.1 例3——非线性负荷的无功补偿

让我们回到例1,一组有功功率和无功功率变化的负荷,由额定功率为 $S_n = 400\text{kVA}$,短路电压为 $e_{\%} = 4.5\%$ 的变压器供应。假设负荷电流失真,表 13.3 给出了谐波电流的最大值。

如果需要的话,我们要检查电压失真度是否保持在允许的范围内,并且计算串联电抗器的阻抗。

由于负荷电流失真,所以有共振发生的可能性。此外,忽略阻抗意味着不考虑某些元素引入的衰减。应该指出的是,谐波电流值与 400kVA 的变压器的额定电流相比是很小的。这种情况下,可以应用图 13.12 中的等效电路。电抗值可以由简单的公式确定:

$$X_{c,min} = \frac{V^2}{Q_{k,max}} = \frac{400}{147.61 \times 10^3} = 0.916 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$X_{c,max} = \frac{V^2}{Q_{k,max}} = \frac{400}{123.93 \times 10^3} = 1.291 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$X_{Tr} = \frac{e_{\%}}{100} \frac{V^2}{S_{Tr}} = 0.045 \times \frac{400}{400 \times 10^3} = 18 \text{ (m}\Omega\text{)}$$

表 13.3 非线性负荷的无功补偿（例 3）

谐波电流最大值				
谐波次序 n	5	7	11	13
$I_{(n)}/A$	10	7.14	5.13	4.1
电压谐波计算				
$Z_{(n)}/\Omega$	0.177	3.365	0.144	0.1
U_n/V	1.768	24.03	0.738	0.414
最大电压失真，补偿器功率最小时发生				
$I_{(n)}$	10	7.14	5.13	4.1
$Z_{(n)}$	0.448	0.046	0.117	0.144
$U_{(n)}$	4.48	0.327	0.6	0.592
元件电流电压上升——最坏情况下的计算结果				
$I_{(n)}$	10	7.14	5.13	4.1
$I_{l(n)}$	59.81	4.54	2.1	1.57
$X_{C(n)}$	0.183	0.131	0.083	0.07
$U_{C(n)}$	10.94	0.59	0.17	0.11

由于补偿器的无功功率会变化，它的电抗也会变化，因此，谐振频率变化。代入上述值，我们确定最大和最小的共振频率 $n_{r,max} = 8.47$ 对于 $Q_{r,max}$ 、 $X_{r,min}$ ， $Q_{r,max}$ 、 $X_{r,max}$ 和 $n_{r,min} = 7.13$ 。由于负荷电流中存在 7 次谐波，所以电容器组加载最大功率时，可能会发生谐振。这会增加 7 次谐波电流，也因此，在公共耦合点（在配电板的母线）上会出现电压畸变。

为了检查在这种情况下是否可以对电容器组进行操作，应该计算出最大的总的电压谐波失真，即 THD。在频率 $n_r = 7.13$ 时，很明显会发生共振，即电容的最大无功功率。知道最大的高次谐波电流值以及电压下降值，就可以计算出电压的 THD。

表 13.3 展示了计算出的各次谐波下的值。计算出的 THD 值应该是

$$THD = \frac{\sqrt{1.768^2 + 24.03^2 + 0.708^2 + 0.414^2}}{230} \times 100\% = 10.48\%$$

这个值超过了 EN 50160^[1] 中设置的关于低电压限制值的 8%。如此高的电压畸变只发生在最大电容器组功率中，因此需要降低电源或应连接串联电抗器。

该反应器应该在电流最低的高次谐波分量中，即 5 次谐波电流中创建一个串联谐振。一个典型的错误是选择 7 次谐波，因为 7 次谐波时发生并联谐振。然而，这将并联谐振频率转向 5 次谐波，使电压畸变率远远高于允许的 8%。因此，我们应该选择频率等于 5 次谐波的电抗器，然后我们得到：

$$X_d = \frac{X_c}{n_s^2} = \frac{0.919}{5^2} = 36.76 \text{ (m}\Omega\text{)}$$

并联谐振频率会在 $n_{r,\max} = 4.86$ 和 $n_{r,\min} = 4.09$ 之间变化。因此这离电流谐波 (即 5 次谐波) 足够远。

现在, 我们计算电容器最小功率, 即共振频率为 4.86 时的最大电压失真 THD。表 13.3 中有计算结果。最大总电压失真 THD 是

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{4.48^2 + 0.327^2 + 0.6^2 + 0.592^2}}{230} \times 100\% = 1.99\%$$

这远远低于允许值。下一步是检查元件是否有合适的工作条件。我们通过公式计算基波电流:

$$I_{f(1)} = \frac{V}{\sqrt{3} (X_c - X_d)} = 262.53 \text{ (A)}$$

表 13.3 展示了最坏情况下的计算结果。

我们通过 $\text{RMS} = \sqrt{\sum I_{(n)}^2}$ 计算电流有效值, 这就产生了:

$$\text{RMS} = \sqrt{262.53^2 + 59.81^2 + 4.54^2 + 2.1^2 + 1.57^2} = 269.31 \text{ (A)}$$

此值应小于允许的电流值。可以根据基尔霍夫电压定律, 或者使用计算出的补偿器分支电流的值, 来得到电容器电压的增加量。因此我们得到的结果见表 13.3。从电压分压器那可以得到电容器基波电压有效值是 $V_{c(1)} = X_c V / (X_c - X_d) = 416.67 \text{ (V)}$ 。产生的方均根值 $\text{RMS} = \sqrt{240.56^2 + 10.94^2 + 0.59^2 + 0.17^2 + 0.11^2} = 240.81 \text{ (V)}$ 。此值应小于最大允许的连续电压。电容器峰值电压由公式 $\text{MAX} = V_{(n)}$ 确定, 这就产生了 $\text{MAX} = 240.56 + 10.94 + 0.59 + 0.17 + 0.11 = 252.37 \text{ (V)}$ 。此值应小于电容器最大允许峰值电压。

13.3 无功补偿

后续无功功率补偿器的使用, 是提高连接点的功率因数和/或电压稳定因子的最有效的方法之一。

图 13.3 展示了不同技术解决方案的分类。它们大多是有相当大的功率的三相系统, 这是为选定的单个负荷或是一组负荷的补偿/电压稳定性而设计的, 这些负荷的特点是基波无功功率变化迅速。

13.3.1 同步冷凝器

同步电动机是一种传统的基波无功功率源, 在本质上是感性的或者容性的。它同一时刻既作冷凝器又作同步电动机时, 也可以作为机械时刻的电源。补偿过程的高动力控制转换单元已安装在发电机励磁电路中, 以及它可以在封闭的控制电路中工作 (见图 13.14) 的事实, 导致了补偿过程中的高动力和连续 - 非离散 - 无功

功率。无功功率的调节也使得稳定机床连接点的电压成为可能。

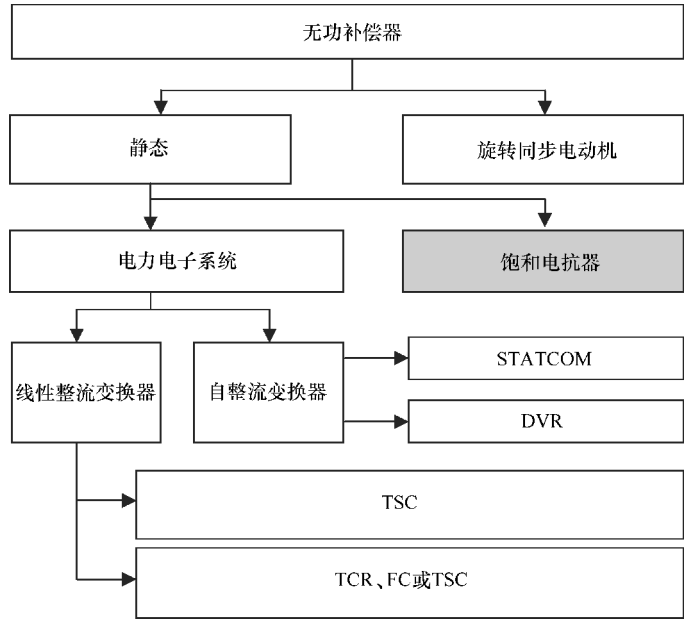


图 13.13 后续无功功率补偿器/动态电压稳定器的分类

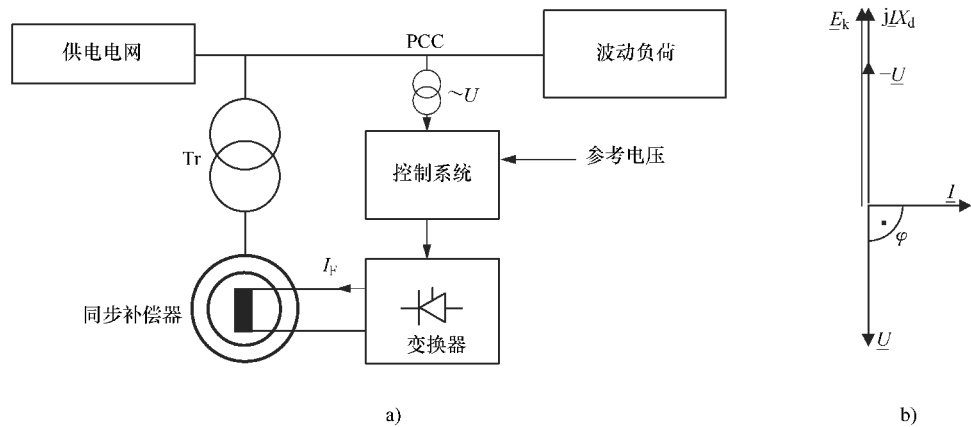


图 13.14 在电压稳定器的电路工作的同步电动机（图 13.14a）和相量图

与静止同步补偿器相比，对于同步电动机情况下的操作质量标准，我们假设的是电流和无功功率的变化速度，而不是响应时间（在动态状态下）。也正是通过这个值，来衡量在 PCC 中补偿器校正的电压变化的速度有多快。这大约等于励磁电流的变化速度并且机械去励磁时的值高于重励磁时。这取决于各种因素，如机器的构造特性、允许的激励电压的最大值、假设的电压强迫因子等。

同步补偿器的缺点如下：

1) 相对较高的损失，额定功率的 1.25% ~ 5.5%。损失增加与电荷损失分别是：2.9% ~ 8% 对额定功率的 50%，5% ~ 14% 对额定功率的 25%。氢冷却补偿器引起的损失比空气冷却补偿器低 10% ~ 30%。

2) 安装无功功率单元的成本增加的同时，补偿器的功率降低。

13.3.2 电容器组

电容器组可以实现与过励的同步补偿器相同的功能，这样它们就可以在当地提供无功功率并且降低线路上的电压降。电容器组的优点如下：

1) 与总的安装功率相比，安装无功功率单位成本变化很小；

2) 它们可以顺序安装，所以它们不需要最初的高投资；

3) 电容器的功率损耗是额定功率的 0.25% ~ 0.30%；

4) 操作成本比相同情况下的同步电动机减少许多；

5) 电容器组产生的无功电能的成本比其他静态补偿安装中产生的小 1/4 ~ 1/3。

电容器组的不方便之处在于，它们不允许连续控制电压，它们不吸收线路的容性功率，它们的功率随着它们的终端电压的二次方降低。

13.3.3 电力电子补偿器/稳定器

一般来说，静态补偿器是包含电抗器和/或晶闸管控制电容器连接到电源节点的电路。它们可以被视为调节平行电纳。它们也可以被用来补偿无功功率，对称电流/电压，或者限制电压波动。在组中最常见的解决办法包括：TSC、一个 FC 电路和一个感性基波电流控制开关的电路（TCR）、FC/TCR 和 TSC/TCR 电路以及 STATCOM 电路。

13.3.3.1 TSC

在这样的电路中，三角形联结的电容器组分成了几个部分：每一部分分别通过交流晶闸管开关（见图 13.15a）开启（或关闭）。开关开启时刻与初始电池充电时刻同步，使得它能够避过过电流和过电压，这会在非同步的电容连接（见图 13.15b）中出现。对称操作的响应时间不超过 20ms。

除此之外，还使用了其他可以被称为“经济”的配置。在这些情况下，其中的一个半导体晶闸管由一个二极管代替。

13.3.3.2 FC/TCR

此解决方法是间接补偿方法的一个例子。其中，这根据电压稳定器或者无功功率补偿器的功能产生的需要而决定，两个电流分量总和的值已经被考虑（见图 13.16）：

1) 电容器的基波电流 i_{FC} ，几乎总是作为一个谐波滤波器/过滤器运作；

2) 反应器的基波电流 i_{TCR} ，被交流晶闸管开关（T）的相位控制调节。

图 13.16a 展示了这种安装的一相原理图，图 13.16b 展示的波形表现了控制角

α 取不同值时的工作原理和电抗器电流波形。

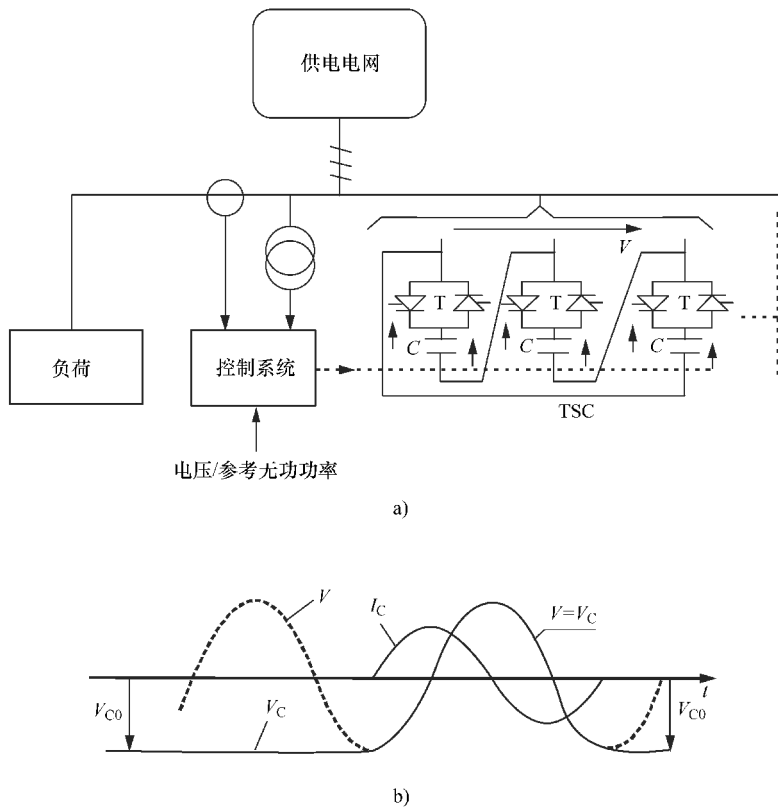


图 13.15 TSC 补偿电容器的示意图 (图 13.15a) 和在电容切换期间的电流和电压波形 (V_{C0} - 电容器的初始电压条件, 图 13.15b)

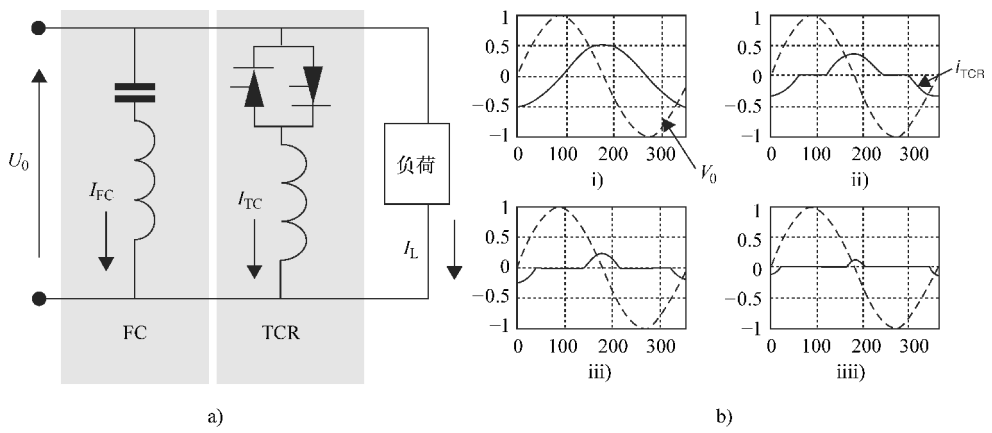


图 13.16 单相 FC/TCR 补偿器的概念图 (图 13.16a) 和 TCR 电流波形 (图 13.16b)

这样的补偿器中，电抗器电流（基波）由晶闸管开关的相位控制调节，它由两个反并联的晶闸管组成。一个电容器组构成了一个电容无功功率源，是并联到电抗器支路的。

控制角与电抗器基波电流和补偿器基波电流（以及系统阻抗上的电压降的值和符号），可以在每个电源电压的半周期中改变，假设为 $(0.5\pi, \pi)$ 范围内的任意值。下面是反应器的无功功率的变化，分别从最大值到零，也有补偿器产生的电流变化的值（有时也是自然 - 感性或容性）。

角度 α 的增加导致了反应器中基波电流的减少，这表示这个谐波下，它的等效感抗增加了，与此同时它的输入基波无功功率降低。

如果电抗器的支路电流等于零（ $\alpha = \pi$ ），补偿器返回到供电电网无功功率，然而它的电流在本质上是容性的。当晶闸管被完全控制（ $\alpha = \pi/2$ ），电抗器功率超过电容器功率的时候，补偿器补偿无功功率，同时它的电流在本质上是感性的。在 $I_{C_{\max}}$ 到 $I_{L_{\max}}$ 范围内，电容器电流的调节在本质上是连续的。

晶闸管开关的相位控制导致了奇数阶高次谐波的产生，而且当两个晶闸管延迟角不相等时，会产生偶次谐波^[3]。由于电抗器是三角形联结，“3”的倍数次谐波在补偿器相电流中被消除（见图 13.17）。供电电网中这些三相电抗器的配置，连同并联谐波滤波器功能，相当于电纳在相 - 相之间转换（见图 13.18）。这些值的变化是改变控制角（ α_{12} 、 α_{23} 、 α_{31} ，其中 1, 2, 3, -1, 2, 3 是相序）的结果，且变化是无级的、独立的。此外，一个大的短路电压（称为 TCT 电路）的变压器的等效电抗可作为电抗器运行。

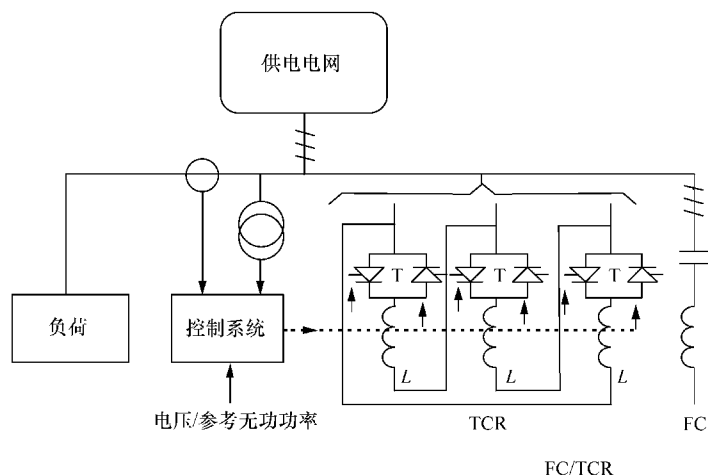


图 13.17 三相 FC/TCR 补偿器示意图

对于负荷的补偿来说，在考虑中的静态补偿器电路是非常成功的，其中的工作条件是不对称的并且随时间变化很快，例如电弧炉补偿。

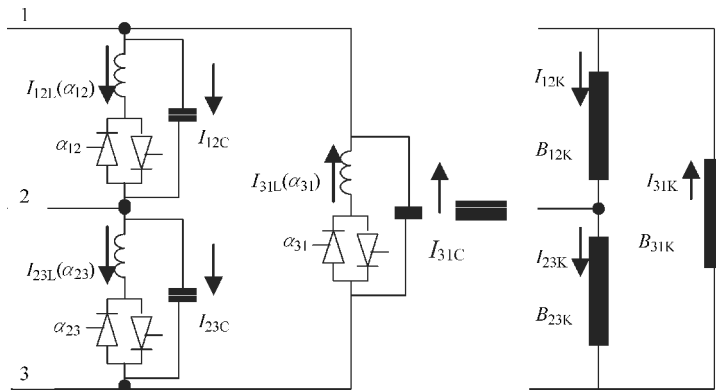


图 13.18 作为对称设备的 FC/TCR 补偿器

为了限制奇次谐波，可以使用由三绕组 Yyd 变压器供应的两个 6 脉冲电路（12 脉冲电路），或者也可以使用更高谐波过滤器。

在 TSC/TCR 中，除 TCR 以外，也可以使用晶闸管投切电容器。在容性电流区域中，电路有一个显著扩大的调节范围。这种解决方案，几乎只用于稳压电路中。结合 TCS 和 FC/TCR 电路的优点，这使得可以最大限度地减少 TCR 的操作过程中产生的电流谐波值，并尽量减少在补偿装置中的有功功率的损失。

13.3.3.3 STATCOM

该电路包括一个整流器 – 最常用的是一个 VSI（电压源逆变器）。它的半导体器件（PWM）的连接条件决定了无功功率的大小以及补偿器无功功率的性质（感性或容性）。

补偿器可以看作一个受控电压源，通过电抗器（见图 13.19a）连接到供电电网。通过电压幅值的调节来控制无功功率流动。这种补偿器有可能类似于同步电动机的补偿器（但它的工作速度快得多）。

由于变换器的输出电压和补偿器 $\delta = 0$ 时连接点上的电网电压之间的相位角，该电路只消耗无功功率：当 $V_{VSC} > V_{bus}$ 时为容性， $V_{VSC} < V_{bus}$ 时为感性（见图 13.19b）。这种情况下，补偿器既是无功功率源，又是无功功率负荷。

应用在配电系统中来改进电源质量的 STATCOM 被称作 DSTATCOM（配电 STATCOM）。它们可以同时执行复杂的任务：无功功率补偿、负荷均衡和滤波。DSTATCOM 系统的基本器件是一个 PWM 电压逆变器，其中使用了全控型半导体器件，例如 IGBT、IGCT。设计 STATCOM 电路的一个新的质量保障是使用多级变换器。它的主要优点是减少谐波辐射，并且减少由于串联的桥或者半导体元件引起的高电压情况下与电网直接相连的可能性。

表 13.4 给出了几种选出的补偿器的比较。

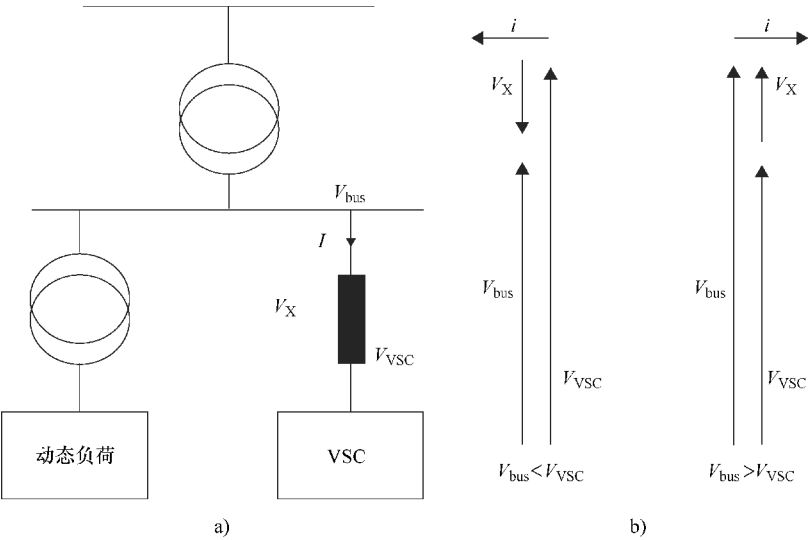


图 13.19 STATCOM 的示意图（连接到供电电网，图 13.19a）和 V_{bus} 与 V_{VSC} 不同关系时的电压、电流相量图（其中 X_k 是电抗器或者变换变压器的电抗， V_{VSC} 是变换器端子的相电压， V_{bus} 是变换器输入电抗上的电压降（ $=X_k I$ ）， I 是补偿器的基波电流）

表 13.4 选定补偿器的比较

SVC				
	同步电动机	FC/TCR	TSC（必要时可带 TCR）	STATCOM
补偿精度	好	很好	好，带 TCR 的话很好	特别好
无功功率变化	容性/感性	容性/间接感性	容性/间接感性	容性/感性
控制	连续	连续	间断/有 TCR 时连续	连续
反应时间	相对较慢	1~2 个周期	1~2 个周期	非常短暂，取决于控制电路和变化频率
谐波	没有	大	没有，带 TCR 时出现	很小，取决于变化频率
损耗	中等	很低，随着容性功率的增加而增加	很低，随着感性功率的增加而增加	非常低，随着变化频率的增加而增加
对称能力	受限	好	受限/好	很好，在三相单元的情况下，受限于三相配置
花费	高	中等	中等	从低到高

参考文献

- [1] EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.
- [2] A. Ghosh and G. Ledwich, *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [3] Angelo Baghini (ed.), *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [4] Z. Hanzelka and A. Bień, *Flicker. Leonardo Power Quality Application Guide*, <http://www.lpqi.org>
- [5] IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, Std. 18-2002.
- [6] J. Kulczycki (ed.), *Electric Energy Losses in Distribution Networks* (in Polish), PTPiREE Publishers, Poznań, 2009.
- [7] W. Szpyra, Simplified model of medium voltage distribution networks for calculation power loss and voltage drop (in Polish), *Proceedings of the Scientific and Technical Conference 'Optimization in Power Engineering'*, Jachranka, October 7–8 1999, pp. 125–134.

深入阅读材料

- W. Szpyra, W. Tylek and A. Kot, Determination of power and energy loss in an extensive low voltage power network, *Proceedings of the Institute of Electrical Power Engineering*, Wrocław University of Technology, Serial: Conferences No.34, The IV Conference 'Electric Power Networks in Industry and Power Sector. Networks 2000', 2, 2000, pp. 403–410.

关于本书

由政府部门倡议的提高电能效率是可持续发展的必要组成部分，可实现控制和减少能源需求。

目前工业电气工程研究领域的一个主要课题是，工程师已经开始将重点放在电能效率的分析、诊断与可行的解决方案上。由于电能效率问题本身所具有的高复杂性和交叉学科的特点，最优的解决方案通常与由保证经济效益的关键方案评价指标有关。

这本唯一的参考书结合电能效率的实际情况，为工程师解决电能效率问题提供了详细的理论和实际应用案例。本书还从电能供应者和电能用户的视角给出了优良电能工程实践的前景。

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

电话服务

社服务中心：010-88361066

销售一部：010-68326294

销售二部：010-88379649

读者购书热线：010-88379203

网络服务

教材网：<http://www.cmpedu.com>

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

机工微博：<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

策划编辑◎顾 谦

国际电气工程先进技术译丛 传播国际最新技术成果 搭建电气工程技术平台

《电能效率：技术与应用》
《高性能交流传动系统 —— 模型分析与控制》
《光伏发电系统的优化 —— 建模、仿真和控制》
《自主移动机器人行为建模与控制》
《覆冰与污秽绝缘子》
《高压直流输电——功率变换在电力系统中的应用》
《MATLAB数值分析方法在电气工程中的应用》
《太阳能利用技术及工程应用》
《超级电容器的应用》
《小型风力机：分析、设计与应用》
《太阳能电池、LED和二极管的原理、PN结的作用》
《风力发电系统 —— 技术与趋势》
《可持续电力系统的建模与控制：面向更为智能和绿色的电网》
《电力系统高级预测技术和发电优化调度》
《大规模储能技术》
《风电系统电能质量和稳定性对策》
《环境能源发电：太阳能、风能和海洋能》
《传热学：电力电子器件热管理》
《现代电力电子学与交流传动》
《功率半导体器件：原理、特性和可靠性》
《风能系统——实现安全可靠运行的优化设计与建设》
《储能技术》
《光伏系统工程》（原书第3版）
《光伏与风力发电系统并网变换器》
《车辆能量管理：建模、控制与优化》
《纯电动及混合动力汽车设计基础》（原书第2版）
《电动汽车技术、政策与市场》
《永磁无刷电机及其驱动技术》
《先进电气驱动的分析、建模与控制》
《智能电网可再生能源系统设计》
《风力发电工程指南》
《用于制造固体氧化物燃料电池的钙钛矿型氧化物》
《太阳能物理》
《柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真》
《风电并网：联网与系统运行》
《可再生能源的转换、传输和储存》
《海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响》
《光伏技术与工程手册》
《风力发电的模拟与控制》
《风电场并网稳定性技术》
《智能电网中的电力电子技术》
《电磁屏蔽原理与应用》
《高效可再生分布式发电系统》
《电网保护》
《分布式发电——感应和永磁发电机》
《电力系统谐波》
《风能与太阳能发电系统——设计、分析与运行》（原书第2版）
《瞬时功率理论及其在电力调节中的应用》
《风力机控制系统原理、建模及增益调度设计》
《高压输配电设备实用手册》
《电力变流器电路》
《电力系统中的电磁兼容》
《超高压交流输电工程》（原书第3版）
《高压直流输电与柔性交流输电控制装置——静止换流器在电力系统中的应用》
《配电可靠性与电能质量》

WILEY

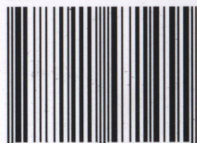
Copies of this book sold without
a Wiley Sticker on the cover are
unauthorized and illegal

上架指导 工业技术 / 电工技术

ISBN 978-7-111-47145-5



ISBN 978-7-111-47145-5



9 787111 471455 >

定价：98.00元